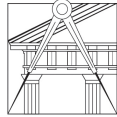




LISBOA

UNIVERSIDADE  
DE LISBOA



**FACULDADE DE ARQUITETURA**  
UNIVERSIDADE DE LISBOA

Título da Tese:

Projeto baseado em Energia: Projeto Digital de Envelopes de Edifícios

Ramo de Doutoramento: Arquitetura

Especialidade: Desenho e Computação

Doutorando: Daniel Fernando Tomé Mateus

Orientadores: *Doctor of Philosophy* Luís António dos Santos Romão

*Doctor of Philosophy* José Manuel Pinto Duarte

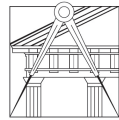
Tese especialmente elaborada para a obtenção do grau de doutor  
2020





LISBOA

UNIVERSIDADE  
DE LISBOA



FACULDADE DE ARQUITETURA  
UNIVERSIDADE DE LISBOA

Título da Tese:

Projeto baseado em Energia: Projeto Digital de Envelopes de Edifícios

Ramo de Doutoramento: Arquitetura

Especialidade: Desenho e Computação

Doutorando: Daniel Fernando Tomé Mateus

Orientadores: *Doctor of Philosophy* Luís António dos Santos Romão

*Doctor of Philosophy* José Manuel Pinto Duarte

**Constituição do Júri:**

**Presidente:** Doutora Cristina Delgado Henriques

Professora Auxiliar, Faculdade de Arquitetura da Universidade de Lisboa

**Vogais:** *Doctor of Philosophy* Luís António dos Santos Romão

Professor Associado, Faculdade de Arquitetura da Universidade de Lisboa

Doutor José Pedro Ovelheiro Marques de Sousa

Professor Auxiliar, Faculdade de Arquitetura da Universidade do Porto

Doutora Sara Eloy Cardoso Rodrigues

Professora Auxiliar, ISCTE-IUL

Doutor José Nuno Dinis Cabral Beirão

Professor Auxiliar, Faculdade de Arquitetura da Universidade de Lisboa

Doutor Nuno Filipe Santos de Castro Montenegro

Professor Auxiliar, Faculdade de Arquitetura da Universidade de Lisboa

Entidade Financiadora:



Tese especialmente elaborada para a obtenção do grau de doutor

2020



# Agradecimentos

Esta tese não teria sido possível sem o apoio de muitas pessoas, às quais expressei a minha profunda e sincera gratidão.

Agradeço aos meus orientadores, o Prof. José Duarte e o Prof. Luís Romão, pelas orientações, pelo interesse e pelo apoio que me concederam. Foi uma experiência muito gratificante o processo ao longo do qual esta tese decorreu, e a aprendizagem e a troca de experiências convosco revelou-se muito útil e enriquecedora, quer do ponto de vista profissional, quer do ponto de vista humano.

Agradeço também ao grupo Design and Computation Group (DCG) do qual faço parte, nomeadamente a todos os amigos e colegas pela amizade, pela troca de experiências e pelo convívio diário, que muito contribuíram também para que a formação desta tese fosse possível.

Expressei igualmente a minha imensa gratidão à Faculdade de Arquitetura da Universidade de Lisboa, em particular ao Centro de Investigação em Arquitetura, Urbanismo e Design (CIAUD), por acolher o trabalho e a investigação por mim realizados, e pelo financiamento e bolsa de investigação que me concedeu, a qual foi uma preciosa ajuda para a realização desta tese, e constituiu motivo de satisfação e de orgulho para mim.

Agradeço ainda à minha família, em especial à minha Mãe, Pai, Irmãos, Tia e Avós, por todo o amor, incentivo e apoio que me concederam ao longo destes anos de elaboração da tese. Esta tese também é vossa.



# Resumo

A presente tese desenvolve um sistema de projeto para o envelope de edifícios, o qual se baseia em processos energéticos, permitindo criar e transformar formas para o envelope de edifícios que sejam capazes de captar de um modo eficiente a irradiação solar incidente no envelope. Pretende assim estabelecer um paradigma de Projeto baseado em Energia, abordando para isso um caso de estudo específico, o Projeto Digital de Envelopes de Edifícios.

Para viabilizar o Projeto baseado em Energia e o Projeto Digital de Envelopes de Edifícios é elaborado um sistema Arquitetura-Envelopes de Edifícios, o qual relaciona o projeto digital de envelopes de edifícios com outros tipos de projeto a montante, nomeadamente o projeto de arquitetura, e a jusante, como o projeto dos vãos de um edifício. É desenvolvida também uma metodologia para o projeto digital de envelopes de edifícios e são elaborados dois instrumentos conceptuais para a conceção de envelopes de edifícios: o conceito teórico de Algoritmo de Forma e uma Gramática do Envelope de Edifícios, baseados nos conceitos de gramática da forma, gramática descritiva, gramática discursiva e gramática genérica. Para a constituição de um instrumento prático de projeto, a gramática do envelope de edifícios é implementada em um protótipo de software, designado por LIDIA, o qual é testado no desenvolvimento de um projeto para o envelope de duas tipologias de moradias unifamiliares, onde é possível comprovar que a gramática do envelope de edifícios é válida para a geração de formas para o envelope de edifícios, que captam de um modo eficiente a irradiação solar incidente no envelope. Deste modo, é comprovada a eficiência do sistema Arquitetura-Envelopes de Edifícios, da metodologia elaborada, do conceito de Algoritmo de Forma, da Gramática do Envelope de Edifícios e do protótipo de software LIDIA, viabilizando-se o Projeto Digital de Envelopes de Edifícios e o paradigma do Projeto baseado em Energia.

## **Palavras-chave:**

Projeto baseado em Energia; Projeto Digital de Envelopes de Edifícios; Algoritmo de Forma; Gramática do Envelope de Edifícios; Gramática da Forma.



# Abstract

The present thesis develops a design system for the buildings envelope that is based on energy processes, allowing to create and transform building envelope shapes that are able to efficiently capture the incident solar radiation on the envelope. Thus, it intends to establish an Energy-based Design paradigm, developing for that a specific case study, the Digital Design of Building Envelopes.

In order to make the Energy-based Design and the Digital Design of Building Envelopes feasible, an Architecture-Building Envelopes system is developed, which links the digital design of building envelopes with other types of upstream design, namely architectural design, and downstream, such as the design of the openings of a building. A methodology for the digital design of building envelopes is also developed and two conceptual instruments for the design of building envelopes are elaborated: the theoretical concept of Form Algorithm and a Buildings Envelope Grammar, based on the concepts of shape grammar, descriptive grammar, discursive grammar and generic grammar. For the development of a practical design instrument, the buildings envelope grammar is implemented in a prototype of a software, called LIDIA, which is tested in the development of a project for the envelope of two typologies of unfamiliar houses, where it can be shown that the buildings envelope grammar is valid for generating shapes for the buildings envelope that efficiently capture the incident solar radiation on the envelope. In this way, it is also shown the efficiency of the Architecture-Building Envelopes system, of the developed methodology, of the Form Algorithm concept, of the Buildings Envelope Grammar and of the LIDIA software prototype, making possible the Digital Design of Building Envelopes and the Energy-based Design paradigm.

## **Keywords:**

Energy-based Design; Digital Design of Building Envelopes; Form Algorithm; Buildings Envelope Grammar; Shape Grammar.



# Índice

CAPÍTULO 1. Sobre o Projeto baseado em Energia: uma introdução.....	1
1.1 A forma como elemento de projeto.....	4
1.2 A energia como elemento de projeto.....	7
1.3 A energia da forma e a forma da energia.....	10
1.4 Problema de Investigação.....	12
1.4.1 Questões de Investigação.....	15
1.5 Hipótese de Investigação.....	16
1.6 Metodologia de Investigação.....	18
1.7 Contribuições da Investigação.....	21
1.8 Organização da Tese.....	28
1.9 Referências do Capítulo 1.....	31
 CAPÍTULO 2. Estado da Arte.....	 33
2.1 Processos de análise da forma e processos de projeto.....	35
2.2 A energia no processo de projeto.....	44
2.3 A energia e as gramáticas da forma.....	54
2.4 Síntese do Capítulo.....	59
2.5 Referências do Capítulo 2.....	61
 CAPÍTULO 3. Projeto baseado em Energia:	
Visão e Linha de Investigação proposta.....	65
3.1 A importância histórica da energia na sociedade.....	67
3.2 Áreas de atividade humana e áreas tecnológicas onde a energia é preponderante.....	72
3.3 A importância da energia nos edifícios e no processo de projeto dos edifícios.....	83
3.3.1 A Diretiva da União Europeia para o Desempenho Energético dos Edifícios e o conceito de “Edifícios com necessidades quase nulas de energia”.....	84
3.3.2 Fases do Ciclo de Vida dos Edifícios e a sua relação com o Desempenho Energético dos Edifícios.....	87
3.4 Proposta de um modelo tipo BEM (Building Energy Modeling) como suporte para o projeto de arquitetura de edifícios.....	94

3.5 Síntese do Capítulo.....	105	
3.6 Referências do Capítulo 3.....	107	
CAPÍTULO 4. Projeto Digital de Envelopes de Edifícios:		
Âmbito, Sistema, Metodologia e Instrumentos.....	109	
4.1 Âmbito.....	111	
4.2 Sistema.....	113	
4.3 Metodologia.....	118	
4.4 Instrumentos.....	127	
4.5 Síntese do Capítulo.....	136	
4.6 Referências do Capítulo 4.....	138	
CAPÍTULO 5. Gramática do Envelope de Edifícios.....		139
5.1 Conceção da Gramática do Envelope de Edifícios.....	141	
5.2 Definição da Gramática do Envelope de Edifícios.....	149	
5.3 Exemplos de aplicação da Gramática do Envelope de Edifícios.....	166	
5.4 Síntese do Capítulo.....	175	
5.5 Referências do Capítulo 5.....	177	
CAPÍTULO 6. LIDIA: Protótipo de um software para suporte ao projeto digital de envelopes de edifícios.....		179
6.1 Conceção do LIDIA.....	181	
6.2 Implementação da Gramática do Envelope de Edifícios.....	188	
6.3 Interface Gráfico.....	195	
6.4 Síntese do Capítulo.....	209	
CAPÍTULO 7. Projeto digital do envelope de duas tipologias de moradias unifamiliares.....		213
7.1 Descrição do caso de estudo.....	215	
7.2 Projeto Digital do Envelope das Moradias.....	219	
7.3 Análise da relação entre forma e desempenho energético do envelope.....	235	
7.4 Discussão dos resultados.....	262	
7.5 Síntese do Capítulo.....	265	
7.6 Referências do Capítulo 7.....	267	
CAPÍTULO 8. Conclusões.....		269
8.1 Reflexão Final.....	271	
8.2 Contribuições.....	276	

8.2.1 Descobertas.....	276
8.2.2 Contribuições de menor relevo.....	277
8.2.3 Contribuições de maior relevo.....	278
8.3 Desenvolvimentos Futuros.....	281
8.4 Referências do Capítulo 8.....	287
ANEXOS.....	289
Anexos do Capítulo 5.....	291
Anexos do Capítulo 7.....	339
Publicações Científicas.....	349



# Lista de Figuras

## CAPÍTULO 1

Figura 1.1: Visualizando o Universo: A Grande Nuvem de Magalhães, uma galáxia satélite da Via Láctea, imagem do Telescópio Espacial Hubble da NASA/ESA.

Figura adaptada de: NASA. 2017. *Large Magellanic Cloud*. Acedida a 24 de Fevereiro, 2020. [https://www.nasa.gov/multimedia/imagegallery/image\\_feature\\_2434.html](https://www.nasa.gov/multimedia/imagegallery/image_feature_2434.html) [Recurso Online].....3

Figura 1.2: Exemplo de uma pedra lascada, utensílio do homem pré-histórico utilizado para a caça e para o corte da carne de animais. A forma das suas faces assemelham-se a triângulos.

Figura adaptada de: Wikipédia. 2019. *Idade da Pedra*. Acedida a 15 de Julho, 2019. [https://pt.wikipedia.org/wiki/Idade\\_da\\_Pedra](https://pt.wikipedia.org/wiki/Idade_da_Pedra) [Recurso Online].....4

Figura 1.3: Metrosol Parasol em Sevilha, Espanha. Construído em 2011. Exemplo de arquitetura que utiliza a computação.

Figura extraída de: inhabitat. 2011. *New Photos of Seville's Gorgeous Metropol Parasol*. Acedida a 15 de Julho, 2019. <https://inhabitat.com/new-photos-of-sevilles-gorgeous-metropol-parasol/> [Recurso Online] .....6

Figura 1.4: Percentagem do consumo de energia no mundo, por setor de atividade. (United Nations Environment and International Energy Agency 2017, 14).....14

Figura 1.5: Consumo de energia solar fotovoltaica no mundo por região.

Figura extraída de: Our world in Data. 2019. *Renewable Energy by Hannah Ritchie and Max Roser*. Acedida a 15 de Julho, 2019. <https://ourworldindata.org/renewable-energy> [Recurso Online].....23

## CAPÍTULO 2

Figura 2.1: Formas de diferentes espécies de peixes e relações entre as mesmas. (adaptada de Thompson [1942] 1992, 1063).....36

Figura 2.2: Monocoque 2.

Figura extraída de: Neri Oxman. 2018. *Monocoque 2*. Acedida a 15 de Julho, 2019. <https://web.media.mit.edu/~neri/site/projects/details/monocoque2.html> [Recurso Online].....43

Figura 2.3: Imagens de modelos 3D de um edifício da Faculdade de Arquitetura do Porto, da autoria do Arqº Álvaro Siza Vieira. (Caldas 2001, 155).....48

Figura 2.4: Exploração de soluções de projeto otimizadas através de uma ferramenta para exploração de soluções paramétricas, o ParaGen, a qual integra o PAS (Performance Assessment Strategies) proposto por Turrin. (Turrin 2014, 343).....49

Figura 2.5: Imagem da ferramenta Performance Explorer no software Rhinoceros 3D. (Wortmann2018, 198).....52

Figura 2.6: Solução de projeto obtida pela ferramenta Opossum para uma parede, a qual proporciona 84% de Iluminação de Luz do Dia Útil, em um contexto com 24% de Probabilidade de Claridade Diurna. (Wortmann2018, 169).....52

Figura 2.7: Diagrama gráfico ilustrativo do sistema TetraScript. (Henriques 2013, 193).....54

Figura 2.8: Imagens de modelos digitais 3D de quatro soluções de projeto para habitações personalizadas, elaboradas através da utilização de uma gramática desenvolvida por Duarte para as casas da Malagueira de Álvaro Siza. (Duarte 2001, 320).....55

Figura 2.9: Modelos 3D de nove soluções geradas pela gramática da forma para o envelope das casas da pradaria de Frank Loyd Wright, ordenadas da esquerda para a direita e de cima para baixo, de acordo com uma crescente necessidade de consumo energético por m<sup>2</sup>. (Granadeiro 2013, 42).....58

### CAPÍTULO 3

Figura 3.1: As quatro revoluções industriais: características.

Figura extraída e adaptada de: Prof. Ana Paula. 2019. *Revolução Industrial 4.0*. Acedida a 15 de Julho, 2019. <https://profanapaulad.wordpress.com/2019/03/025/revolucao-industrial-4-0/> [Recurso Online].....68

Figura 3.2: Figura esquemática de uma cidade inteligente (smart city), ilustrando a conexão entre os diversos serviços e elementos de uma cidade.

Figura extraída de: The Daily Star. 2019. *Debunking the smart-city myth*. Acedida a 16 de Agosto, 2019. <https://www.thedailystar.net/opinion/the-grudging-urbanist/news/debunking-the-smart-city-myth-1749721> [Recurso Online].....75

Figura 3.3: Figura alusiva à utilização da robótica na construção.

Figura extraída de: Robotic Industries Association. 2018. *How Construction Robots are Disrupting the Industry*. Acedida a 16 de Agosto, 2019. <https://www.robotics.org/blog-article.cfm/How-Construction-Robots-are-Disrupting-the-Industry/90> [Recurso Online].....77

Figura 3.4: Percentagem do consumo de energia no mundo, por setor de atividade (United Nations Environment and International Energy Agency 2017, 14).....78

Figura 3.5: Figura esquemática de uma Casa Inteligente (Smart Home), ilustrando a conexão entre diversos dispositivos dentro de uma habitação.

Figura extraída de: ValueWalk. 2019. *Are Smart Homes Worth More?*. Acedida a 16 de Agosto, 2019. <https://www.valuewalk.com/2018/10/are-smart-homes-worth-more/> [Recurso Online].....79

Figura 3.6: Figura ilustrativa da tecnologia robótica.

Figura extraída de: Robohub. 2017. *Envisioning the future of robotics*. Acedida a 16 de Agosto, 2019. <https://robohub.org/envisioning-the-future-of-robotics/> [Recurso Online].....81

Figura 3.7: Imagem ilustrando a impressão 3D de uma ponte.

Figura extraída de: CityMetric. 2018. *Here's the science behind 3D printing in construction*. Acedida a 16 de Agosto, 2019. <https://www.citymetric.com/fabric/here-s-science-behind-3d-printing-construction-4029> [Recurso Online].....82

Figura 3.8: Logótipo dos “Nearly Zero Energy Buildings (NZEB)”.

Figura extraída de: European Commission. 2010. *Nearly zero-energy buildings*. Acedida a 17 de Julho, 2019. <https://ec.europa.eu/energy/en/topics/energy-efficiency/energy-performance-of-buildings/nearly-zero-energy-buildings> [Recurso Online].....85

Figura 3.9: Tabela com as quatro fases principais propostas para o ciclo de vida dos edifícios.....89

Figura 3.10: Etapas do processo tradicional de trabalho em um modelo tipo BIM.....	97
Figura 3.11: Etapas do processo proposto de trabalho em um modelo tipo BEM.....	98
<b>CAPÍTULO 4</b>	
Figura 4.1: Imagem da pele humana vista de perto.	
Figura extraída de: Clínica Luz. 2009. <i>A pele é o maior órgão do corpo humano</i> . Acedida a 17 de Julho, 2019. <a href="http://clinicaluz.com.br/a-pele-e-o-maior-orgao-do-corpo-humano/">clinicaluz.com.br/a-pele-e-o-maior-orgao-do-corpo-humano/</a> [Recurso Online].....	
Figura 4.2: Figura ilustrativa do Sistema AE proposto, com as respectivas classes de objetos.....	114
Figura 4.3: Correspondência entre as fases da metodologia proposta para o Projeto Digital de Envelopes de Edifícios e as classes de objetos do sistema AE, onde são alocadas as informações e os dados definidos nas diferentes fases.....	120
Figura 4.4: Articulação entre as fases propostas para o modelo tipo BEM e as fases propostas para o Projeto Digital de Envelopes de Edifícios.....	125
Figura 4.5: Figura ilustrativa da relação entre Algoritmo de Forma (ou “Gramática Universal”), Gramática Genérica, Gramática Específica e Gramática Discursiva.....	130
Figura 4.6: Relação entre as gramáticas da Gramática do Envelope de Edifícios e as fases da metodologia do Projeto Digital de Envelopes de Edifícios.....	135
<b>CAPÍTULO 5</b>	
Figura 5.1: Relação entre Gramática Genérica do Envelope de Edifícios e Gramáticas Específicas do Envelope de Edifícios.....	148
Figura 5.2: Tabela com os Grupos de Características, Variáveis, Tipos de Variáveis e Valores Alfanuméricos e Formais da gramática descritiva.....	152
Figura 5.3: Descrição inicial U da gramática descritiva em formato de variáveis.....	152
Figura 5.4: Descrição inicial U da gramática descritiva em formato de valores.....	153
Figura 5.5: Regra d0 da gramática descritiva, de Descrição Inicial da Gramática do Envelope de Edifícios.....	153
Figura 5.6: Etapas e operações de transformação da gramática do envelope de edifícios.....	156
Figura 5.7: Regra 17 da Gramática do Envelope de Edifícios (transformações de forma nas gramáticas de forma paralelas).....	160
Figura 5.8: Regra 17 da Gramática do Envelope de Edifícios (descrição da gramática descritiva).....	161
Figura 5.9: Regra 20 da Gramática do Envelope de Edifícios (transformações de forma nas gramáticas de forma paralelas).....	162
Figura 5.10: Regra 20 da Gramática do Envelope de Edifícios (descrição da gramática descritiva).....	163
Figura 5.11: Árvore de derivações da Gramática do Envelope de Edifícios.....	167
Figura 5.12: Imagem ampliada da parte superior da ramificação da árvore de derivações.....	168

Figura 5.13: Imagem ampliada da parte inferior da ramificação da árvore de derivações.....	169
Figura 5.14: Exemplos de derivações da Gramática do Envelope de Edifícios, com o correspondente desempenho.....	170

## CAPÍTULO 6

Figura 6.1: Logótipo do protótipo LIDIA.....	181
Figura 6.2: Sistema de Projeto Misto proposto para o LIDIA.....	184
Figura 6.3: Modelos de Modelação e Tipos de Softwares utilizados pelo Sistema de Projeto Misto proposto.....	186
Figura 6.4: Conjunto de componentes de programação visual do LIDIA, elaborados para o software Grasshopper, localizados na zona assinalada pela letra A.....	188
Figura 6.5: Componentes de programação visual do LIDIA, elaborados para o software Grasshopper.....	189
Figura 6.6: Exemplo de Componente feito para o Grasshopper: Componente “Normalização Seletiva”.....	191
Figura 6.7: Exemplo de código editado em Grasshopper Python Script Editor para o Componente “Normalização Seletiva”.....	192
Figura 6.8: Modelo de interface gráfico para a elaboração de componentes de programação visual específicos para o LIDIA.....	196
Figura 6.9: Modelo de interface gráfico para a utilização do LIDIA.....	197
Figura 6.10: Fluxo de trabalho previsto para a utilização do LIDIA.....	199
Figura 6.11: Página do LIDIA relativa ao “Contexto, Programa e Espaço Interior”.....	203
Figura 6.12: Exemplo de uma página do LIDIA relativa à “Forma Inicial”.....	205
Figura 6.13: Exemplo de uma página de “Transformação”.....	206
Figura 6.14: Exemplo de uma janela de Avaliação do envelope de um edifício (a parte superior).....	207
Figura 6.15: Exemplo de uma janela de Avaliação do envelope de um edifício (a parte inferior).....	208

## CAPÍTULO 7

Figura 7.1: Localização do lote urbano vago na freguesia de Belém, cidade de Lisboa. Lote assinalado a vermelho. Figura extraída de: Google Maps. 2019. <i>Freguesia de Belém, Lisboa</i> . Acedida a 17 de Julho, 2019. <a href="https://www.google.pt/maps/search/freguesia+de+belém,+lisboa/@38.7017197,-9.2220976,16.71z">https://www.google.pt/maps/search/freguesia+de+belém,+lisboa/@38.7017197,-9.2220976,16.71z</a> .....	215
Figura 7.2: Inserção dos dados para a moradia de tipologia T5 no componente de “Contexto Legal” do protótipo LIDIA.....	219
Figura 7.3: Planta da tipologia T2 inserida no módulo paramétrico comum.....	221

Figura 7.4: Planta da tipologia T5 inserida no módulo paramétrico comum.....	221
Figura 7.5: Forma Inicial do envelope da tipologia T2.....	222
Figura 7.6: Forma Inicial do envelope da tipologia T5.....	222
Figura 7.7: Formas estáticas do envelope da tipologia T2 (parte 1).....	227
Figura 7.8: Formas estáticas do envelope da tipologia T2 (parte 2).....	228
Figura 7.9: Forma dinâmica do envelope da tipologia T2.....	229
Figura 7.10: Formas estáticas do envelope da tipologia T5 (parte 1).....	231
Figura 7.11: Formas estáticas do envelope da tipologia T5 (parte 2).....	232
Figura 7.12: Forma dinâmica do envelope da tipologia T5.....	233
Figura 7.13: Tabela com os valores de irradiação incidente para as formas estáticas (Envelope e Cobertura) da tipologia T2.....	238
Figura 7.14: Tabela com os valores de irradiação incidente para as formas dinâmicas da tipologia T2.....	239
Figura 7.15: Tabela com os valores de irradiação incidente (Fachada Lateral Esquerda) para as formas estáticas da tipologia T2.....	240
Figura 7.16: Tabela com os valores de irradiação incidente para as formas estáticas (Envelope e Cobertura) da tipologia T5.....	245
Figura 7.17: Tabela com os valores de irradiação incidente para as formas dinâmicas da tipologia T5.....	246
Figura 7.18: Tabela com os valores de irradiação incidente (Fachada Lateral Esquerda) para as formas estáticas da tipologia T5.....	247
Figura 7.19: Tabela com o “Valor de energia elétrica gerada”, o “Valor de consumo de energia elétrica” e o “Ganho energético relativo à Forma Inicial”, nas superfícies das coberturas das moradias de tipologias T2 e T5.....	253
Figura 7.20: Tabela com o “Valor de energia elétrica gerada”, o “Valor de consumo de energia elétrica” e o “Ganho energético relativo à Forma Inicial”, nas superfícies das fachadas laterais esquerdas das moradias de tipologias T2 e T5.....	256
Figura 7.21: Tabela com as áreas de tecnologia fotovoltaica (eficiência de 22,2%) necessárias, na cobertura, para a geração da energia estimada para o consumo nas moradias de tipologias T2 e T5.....	257
Figura 7.22: Tabela com as áreas de tecnologia fotovoltaica (eficiência de 22,2%) necessárias, na fachada lateral esquerda, para a geração da energia estimada para o consumo nas moradias de tipologias T2 e T5.....	258



# **CAPÍTULO 1**

## **Sobre o Projeto baseado em Energia: uma introdução**



# CAPÍTULO 1

## Sobre o Projeto baseado em Energia: uma introdução

A presente tese aborda o processo de projeto no amplo sentido do termo, enquanto atividade que planeia e projeta a intervenção do ser humano sobre a realidade. Pretende ser diretamente aplicável aos campos da Arquitetura, Urbanismo e Design, tradicionalmente considerados de carácter artístico, mas também ambiciona ser útil aos campos de carácter científico, como sejam as Engenharias, a Medicina, as Ciências Biológicas e as Ciências Sociais. Baseia-se na ideia de que a energia, tal como a forma, é um elemento essencial para o projeto de algo que se pretende que intervenha na realidade. Parte da premissa de que a forma das coisas existentes na Natureza e no Universo (Figura 1.1) advém de processos em que a energia tem um papel fundamental, os quais por este motivo designaremos por processos energéticos geradores de forma.



Figura 1.1: Visualizando o Universo: A Grande Nuvem de Magalhães, uma galáxia satélite da Via Láctea, imagem do Telescópio Espacial Hubble da NASA/ESA. (adaptada de NASA 2017)

Como tal, a presente tese pretende desenvolver um modelo semelhante para as criações do ser humano, abordando particularmente os edifícios. Mais

especificamente e como caso de estudo, procurando contribuir para a solução dos problemas energéticos enfrentados atualmente pela sociedade, o objectivo consiste em desenvolver um processo para projetar o envelope dos edifícios, de modo a aumentar a capacidade destes na captação de energia solar para transformação em energia elétrica, através da utilização de tecnologia fotovoltaica. Procura-se assim que os edifícios atinjam a auto-suficiência energética e introduz-se também deste modo o conceito de projeto baseado em energia, à semelhança do já existente projeto baseado em materiais, conforme se explica mais adiante.

## 1.1 A forma como elemento de projeto

Ao longo da história da Humanidade, é clara a importância da forma para as criações do ser humano. No início, o relacionamento do ser humano com a forma foi feito de um modo espontâneo, elaborando utensílios para a sua sobrevivência, como o que se ilustra na Figura 1.2, ou representando criaturas com as quais lidava.



Figura 1.2: Exemplo de uma pedra lascada, utensílio do homem pré-histórico utilizado para a caça e para o corte da carne de animais. A forma das suas faces assemelham-se a triângulos. (adaptada de Wikipédia 2019)

Porém, ao longo do tempo, esse relacionamento foi evoluindo progressivamente para um modo planeado. O ser humano começou a projetar a forma dos objetos

que pretendia criar. O ato de projetar verifica-se primeiro nos domínios artísticos ditos tradicionais, a Arquitetura, a Escultura e a Pintura, de modo mais consolidado a partir do Renascimento (desde o século XIV), e mais tarde no domínio industrial, a partir da Revolução Industrial (com início no século XVIII), a qual permitiu o surgimento do campo do Design e a produção de objetos em série. O design caracterizou-se desde logo por adotar uma postura mais científica na conceção dos seus objetos, comparativamente às disciplinas artísticas tradicionais, as quais privilegiavam sobretudo aspetos de natureza estética. Os produtos do design destinavam-se e destinam-se ainda hoje em dia a ser utilizados por um elevado número de pessoas, na maior parte dos casos, pelo que o design desde cedo sentiu a necessidade de conceber e entender de um modo rigoroso as formas que permitissem aos objetos cumprir a sua função.

Assim sendo, pelo menos desde o Renascimento, com o surgimento das teorias arquitetónicas, a criação de forma, entendida como a produção de forma inspirada pela teoria, tornou-se um corpo de conhecimento autónomo. Na arquitetura e no design industrial, o mais sensível do ponto de vista cultural dos campos do design, a forma cresceu tanto na preponderância quanto na precedência temporal no processo de projeto, a tal ponto que a condição de a forma anteceder a materialização se tornou uma normativa e ser virtualmente intuitiva na cultura do design contemporâneo (Oxman 2010, 27).

O aparecimento da revolução digital (no último quarto do século XX), constituiu a última grande evolução no modo de abordar a forma. A transição das tecnologias analógicas para as tecnologias digitais alterou os instrumentos dos profissionais que trabalham a forma. Do desenho rigoroso manual a regra e esquadro e da elaboração de maquetes físicas, mudou-se para a utilização do computador. No início o computador foi utilizado apenas como um instrumento que permitia a representação mais rápida e rigorosa das formas pretendidas. No entanto, a esta fase inicial de computerização das formas, onde se fez a mudança da representação das formas do papel para o computador, seguiu-se uma fase de computação, onde as formas começaram a ser criadas diretamente no computador, recorrendo à sua capacidade de cálculo e servindo este, deste modo, como uma extensão do intelecto humano (Terzidis 2006, xi). A Figura 1.3

ilustra um exemplo de arquitetura que recorre à computação para a elaboração de forma de um modo criativo. Por meio da computação, abriu-se assim caminho para a investigação de novas formas e geometrias, caminho esse que se encontra a ser explorado na atualidade, recorrendo-se a instrumentos computacionais tais como a programação textual e a programação visual para a elaboração de algoritmos geradores de forma.



Figura 1.3: Metrosol Parasol em Sevilha, Espanha. Construído em 2011.  
Exemplo de arquitetura que utiliza a computação. (inhabitat 2011)

Neste contexto, vivemos numa época de descoberta da forma e dos processos que a geram.

*“The implementation and broad absorption of enhanced computational design tools in architectural practice has, since the early nineties, motivated a renaissance of the formalist project in architecture; geometrically complex shapes became emblems of creativity in digital design environments and supported the design mastery of complex geometries in form generation. This formal and geometric design orientation has also addressed “free form” design and architecture along with their enabling technologies as part of the*

*larger design phenomenon of the “mass customization” of “non-standard” form. “ (Oxman 2010, 28)*

A personalização em série é um paradigma de produção e gestão segundo o qual os produtos e os serviços são adaptados de acordo com as necessidades e preferências do cliente individual, com uma eficiência próxima da produção em série, o que resulta em custos mais baixos quando comparados com a personalização tradicional. Este conceito aparentemente auto-contraditório tem repercussões interessantes no modo como os produtos e os serviços são projetados, nomeadamente uma maior participação dos utilizadores finais no processo de projeto e de design (Castro e Costa 2018, 18). Deste modo, através da personalização em série, os clientes e utilizadores têm a possibilidade de participar na definição da forma dos produtos que adquirem, seja esse produto uma habitação ou uma peça de louça utilitária em cerâmica.

A geração e descoberta de forma por meio de algoritmos computacionais e a definição da forma dos produtos por meio de processos de personalização em série são os principais desafios com que o conhecimento da forma se depara na atualidade, nas atividades de projeto e de design.

## **1.2 A energia como elemento de projeto**

Durante o processo de conceção de um projeto, após a definição da forma do que se pretende criar, procede-se à definição da sua materialização. É esta a metodologia mais comum no processo de projeto contemporâneo, herdada do Renascimento e consolidada a partir da Revolução Industrial.

*“ In contradistinction to craft production in which material and form are naturally intertwined into a tradition of making, modern design and production have historically evolved away from this integration towards the compartmentalization of form-making as a process independent of its sources in material knowledge. ” (Oxman 2010, 27)*

Este progressivo destaque dado à forma acentuou-se com a revolução digital. O uso dos computadores no processo criativo de projeto permitiu a obtenção de liberdade em termos de expressão formal, mas também ampliou a separação entre forma e matéria e fez com que a separação hierárquica e sequencial dos processos de modelação, análise e fabrico fosse infinitamente mais pronunciado (Oxman 2010, 28).

Tal separação entre forma e material provocou, em muitas situações, uma falta de eficiência nas soluções de projeto, pois nem sempre os materiais aplicados foram os mais adequados para as formas pretendidas, levando a um desfasamento entre as formas projetadas e os materiais que corporificam essas formas. Assim sendo, nas últimas três décadas (a última do século XX e as duas primeiras do século XXI) tem sido adotada uma nova abordagem à materialidade em projeto, na qual o conceito de *Material-based Design Computation* (em português, Computação de Projeto baseada em Materiais) assume um papel de relevo. A Computação de Projeto baseada em Materiais procura integrar propriedades materiais e condições ambientais dentro dos processos computacionais de geração de forma (Oxman 2010, 29). Deste modo, relaciona os elementos forma e matéria no processo criativo de projeto, integrando-os em simultâneo nesse processo. O objetivo consiste em obter produtos mais ecológicos e eficientes no seu desempenho. A forma é consequência das propriedades dos materiais utilizados e os materiais utilizados têm em conta as condições ambientais para onde os produtos são projetados.

A presente tese pretende demonstrar que a energia também é um elemento válido quer para a definição da forma, quer para a definição dos materiais durante o processo criativo em projeto.

*“ At the beginning of this universe, there were no galaxies, stars or planets, no life or civilizations, merely a uniform, radiant fireball filling all of space. The passage from the Chaos of the Big Bang to the Cosmos that we are beginning to know is the most awesome transformation of matter and energy that we have been privileged to glimpse. ” (Sagan 1980)*

A energia é um elemento que está presente na formação do universo e de tudo o que o compõe. A própria matéria, composta por átomos, é também composta em grande parte por energia que permite a interação e ligação entre os diferentes átomos, formando deste modo moléculas. Assim sendo, as transformações energéticas que ocorrem na matéria são responsáveis pela separação e/ou ligação dos átomos e das moléculas entre si, em diferentes combinações possíveis. A água, por exemplo, quando é submetida à passagem de uma corrente elétrica, é decomposta em moléculas de hidrogénio e oxigénio, num processo denominado de eletrólise. A própria formação da vida se deve a uma série de processos energéticos, nos quais o sol desempenha um papel fundamental.

*“ When the Sun turned on, its ultraviolet radiation poured into the atmosphere of the Earth; its warmth generated lightning; and these energy sources sparked the complex organic molecules that led to the origin of life. [...] Life on Earth runs almost exclusively on sunlight. Plants gather the photons and convert solar to chemical energy. [...] Farming is simply the methodical harvesting of sunlight, using plants as grudging intermediaries. We are, almost all of us, solar-powered. ”*  
(Sagan 1980)

No campo da Arquitetura, a energia tem sido atualmente abordada de acordo com o conceito de *performance-based design* (projeto baseado no desempenho), o qual sugere que a força motriz por trás de qualquer atividade de projeto é o desejo de obter uma solução qualitativa para uma combinação particular de forma e função em um contexto específico. Para além disso, sugere que essa solução qualitativa só pode ser determinada por uma avaliação de desempenho multicritério e multidisciplinar, a qual compreende uma soma ponderada de várias funções de satisfação do desempenho (Kalay 1999, 395). Tais funções, no que diz respeito ao desempenho energético, são muitas vezes executadas numa fase posterior à conceção da forma, analisando apenas as formas projetadas.

A presente tese propõe um sistema, uma metodologia e instrumentos de projeto que contribuem para a visão do *performance-based design*, fazendo-o evoluir. Fá-lo permitindo conceber soluções formais que sejam eficientes para o bom desempenho energético do que se está a projetar. Tais soluções formais são obtidas através de processos de elaboração de forma que se adequam com os processos energéticos existentes na realidade, tais como, por exemplo, a trajetória que os raios solares efetuam na atmosfera do planeta Terra, ao longo do dia e do ano.

### 1.3 A energia da forma e a forma da energia

A forma das coisas que existem na Natureza são o resultado de processos evolutivos. Designa-se por morfologia o campo que investiga a forma.

*“ Morphology is not only a study of material things and of the forms of material things, but has its dynamical aspect, under which we deal with the interpretation, in terms of force, of the operations of Energy\*.”*

*“ \* This is a great theme. Boltzmann, writing in 1886 on the second law of thermodynamics, declared that available energy was the main object at stake in the struggle for existence and the evolution of the world.”*

*(Thompson 1942 [1992], 19)*

A forma das coisas naturais é dinâmica, evolui com o tempo e de acordo com as interações energéticas que ocorrem na matéria das próprias coisas, no seu meio envolvente, e entre as próprias coisas e o seu meio envolvente. A energia e os processos energéticos são o fator determinante que moldam e transformam a forma das coisas naturais. No caso dos seres vivos, a busca e a evolução por formas que melhor permitam captar a energia vinda do exterior e que melhor permitam transformar e utilizar essa energia no interior dos seus corpos, ditou a evolução das espécies. As espécies vegetais, assentes no mesmo local, poderão parecer formas estáticas, mas não o são. As raízes e os ramos das árvores crescem, os seus ramos dão frutos em alguns períodos do ano, e as suas folhas expõem-se ao sol no sentido de captarem o melhor possível a energia solar. As espécies animais são móveis, deslocam-se na procura de

alimento que lhes forneça as suas necessidades energéticas e têm uma maior interação com o meio que as rodeia, o que lhes permite evoluir de um modo mais eficiente. A forma do corpo humano tem braços, pernas, mãos e pés, que lhe proporcionam lidar com o meio, quer para a obtenção de energia para o seu corpo, quer para a modificação do meio no sentido de obter conforto energético para o corpo humano. A obtenção de energia é feita através dos alimentos e da exposição à luz solar, a modificação do meio é realizada através da construção de abrigos.

Aplicando esta lógica a um edifício, o qual constitui um abrigo para o ser humano, interessa que a forma do edifício seja eficiente na criação de conforto energético para o corpo humano e na capacidade de geração da energia necessária para o funcionamento do edifício. A energia da forma, ou seja, o desempenho energético da forma, dependerá das suas características geométricas, do contexto do seu meio envolvente e do funcionamento interno do edifício. Esta questão está diretamente relacionada com o tema da presente tese, o qual consiste em estabelecer uma visão para o Projeto baseado em Energia, bem como um sistema, uma metodologia e instrumentos para o Projeto Digital de Envelopes de Edifícios. Como prova de conceito desse sistema, metodologia e instrumentos, na presente investigação é apresentado um protótipo de software que permite o projeto de formas para os envelopes de edifícios, formas essas que têm a capacidade de gerar a energia necessária para o funcionamento dos próprios edifícios.

Complementando a questão da energia da forma, é também útil abordar uma outra questão, também ela componente do Projeto baseado em Energia: a forma da energia.

*“ Energy has shape. Energy transforms and trans-shapes in an evolving way. Planck’s contemporary scientists were not paying any attention to that. Science has been thinking shapelessly. ”*

*(Fuller 1975, 123)*

Trata-se de uma questão que diz respeito sobretudo às disciplinas do campo científico, nomeadamente as que estudam e investigam de modo mais próximo a energia. No entanto, tem utilidade e aplicabilidade também no campo projetual, nomeadamente, nas disciplinas da Arquitetura, Urbanismo e Design. A energia, ou as energias, como a eletromagnética, a gravitacional, a nuclear e a química, têm diferentes formas, as suas características advêm também da sua forma. O conhecimento e o domínio destas energias e das suas formas pode influenciar o modo como criamos e projetamos. A aplicação deste conhecimento poderá ter a capacidade de influenciar o desempenho formal dos objetos criados, os quais poderão alterar a sua forma ao longo do tempo consoante a aplicação de energia, respondendo desse modo a uma determinada função ou necessidade.

## 1.4 Problema de Investigação

O Projeto baseado em Energia caracteriza-se por constituir um modo de projetar que se assemelha aos processos de formação das coisas, vivas e não vivas, existentes na Natureza e no Universo. Tais processos de formação são processos essencialmente energéticos, de transferência e de transformação de energia, podendo por isso ser designados por processos de formação orientados pelo desempenho energético ou, de forma abreviada, processos de formação energéticos. Os corpos dos seres vivos procuram adotar formas que sejam as mais eficientes possíveis na captação, transformação e utilização da energia que necessitam para a sua sobrevivência e evolução. Assim sendo, interessa desenvolver um método de projeto semelhante aos processos de formação existentes na Natureza e no Universo. Tal método de projeto dever-se-á basear em uma abordagem de *“performance-based design”*, ou seja, uma abordagem de projeto baseado em desempenho, nomeadamente desempenho energético. Por desempenho energético, entende-se o balanço entre a energia que as formas projetadas são capazes de produzir e consumir. No âmbito da presente tese, contudo, a temática do desempenho encontra-se focada na energia que as formas projetadas são capazes de produzir através da captação de energia solar e da sua transformação em energia elétrica. O aspeto do consumo energético é encarado como um elemento fixo, o qual serve como termo de comparação para validar a eficiência do desempenho das formas projetadas na produção de

energia elétrica. Pretende-se abordar a temática do consumo de energia, de um modo mais aprofundado, numa etapa posterior à presente tese. Assim sendo, o método de projeto a desenvolver deverá procurar melhorar o desempenho das formas projetadas na captação de energia solar e produção de energia elétrica, nomeadamente através da utilização de elementos fotovoltaicos, encarando o desempenho do consumo de energia como um valor fixo. Deste modo, pretende-se que através do método de projeto proposto, o desempenho das formas projetadas na captação e na produção de energia, supere o consumo de energia apresentado por essas mesmas formas.

Para perceber como funcionam os processos de formação energéticos e como podem estes ser aplicados nas criações do ser humano, de modo a dotá-las de um melhor desempenho, interessa investigar esses mesmos processos utilizando um caso de estudo em concreto.

Do valor total de consumo de energia em todo o mundo, os edifícios são responsáveis por 36% desse valor, de acordo com dados recentes da United Nations e da International Energy Agency (Nações Unidas e Agência Internacional da Energia). A energia consumida em edifícios, nos setores de atividade Residencial e Não-Residencial, correspondeu no ano de 2016 a 30% do valor total de consumo de energia no mundo, e a energia consumida pelo setor de atividade da Indústria da Construção correspondeu a 6% desse mesmo valor total de consumo (United Nations Environment and International Energy Agency 2017, 14), conforme se pode visualizar na Figura 1.4.

Muita dessa energia é produzida em centrais termoelétricas e provém da transformação de combustíveis fósseis em energia elétrica. Os combustíveis fósseis são motivo de poluição da atmosfera, tendem a escassear no futuro (pois as suas reservas são finitas) e apenas existem em alguns locais do planeta. A energia elétrica produzida nas centrais é transportada para os locais de consumo por infraestruturas de eletricidade de alta tensão, as quais têm custos económicos elevados e impactos ambientais negativos na paisagem. Todos estes fatores contribuem para que a energia tenha um papel determinante no panorama da economia mundial.

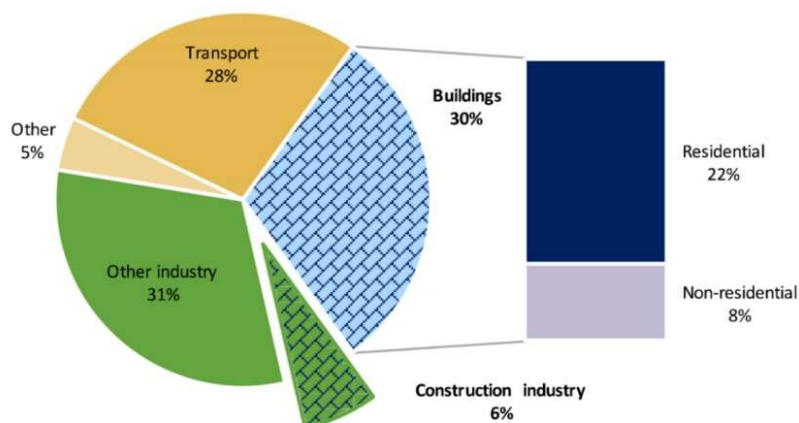


Figura 1.4: Percentagem do consumo de energia no mundo, por setor de atividade.  
(United Nations Environment and International Energy Agency 2017, 14)

*" A economia mundial defronta-se na atualidade com dois grandes desafios: a obtenção de energia a preços competitivos e a crescente necessidade de recursos energéticos. São duas dimensões de um mesmo problema que junta, na discussão, competitividade das economias e a sustentabilidade ambiental. " (IAPMEI 2013, 2)*

Neste contexto, tem-se assistido no panorama mundial a uma crescente aposta na utilização de energias renováveis (provenientes do sol, vento, mar, biomassa, entre outros) que sejam endógenas, ou seja, que existam no próprio local geográfico. Assim sendo, faz sentido incentivar a produção de energia renovável nos próprios edifícios, de modo a que estes produzam no mínimo a energia que consomem. Minimizam-se assim os custos económicos e ambientais da geração de energia, aumentando e diversificando as fontes para a sua obtenção. O local dos edifícios de maior potencial para a geração de energia consiste no seu envelope, o qual se encontra exposto à energia solar, considerada a fonte de energia renovável de maior relevo. É possível transformar a energia solar em energia elétrica através da utilização de tecnologia fotovoltaica, por exemplo. Nesse sentido, importa projetar, construir e reabilitar o envelope dos edifícios de modo a torná-los eficientes na captação de energia solar e na subsequente produção de energia elétrica. A forma dos envelopes desempenha um papel fundamental nesse aspeto. É este o caso de estudo da presente tese. Sabe-se que quanto mais eficiente for a tecnologia fotovoltaica na transformação da

energia solar em energia elétrica, maior será a quantidade de energia elétrica produzida no envelope dos edifícios. No entanto, a questão da eficiência da tecnologia fotovoltaica não é abordada e investigada na presente tese, não estando no âmbito da temática da mesma. É utilizado, isso sim, um valor fixo de eficiência da tecnologia fotovoltaica, valor esse que é um valor comum da eficiência dos painéis fotovoltaicos existentes no mercado português.

Em síntese, considerando-se que os edifícios são habitualmente grandes consumidores de energia, e que a conceção arquitetónica não questiona geralmente o seu grande consumo energético, o problema de investigação da presente tese consiste em como se pode tornar os edifícios também produtores de energia, para além de consumidores, e em como se pode projetar os edifícios de modo a que estes sejam eficientes no que se refere à captação de energia solar, tornando-os assim capazes de produzir no mínimo a energia elétrica que consomem. Este problema é também abordado de modo mais concreto, consistindo em específico em como é que se pode projetar o envelope dos edifícios, de modo a que os envelopes possam maximizar a captação de energia solar, com o objetivo de que consigam produzir no mínimo a energia elétrica que os edifícios necessitam de consumir.

### **1.4.1 Questões de Investigação**

Tendo em conta o problema identificado, são enunciadas duas questões de investigação que abordam esse mesmo problema e que orientam o processo de investigação, às quais a presente tese pretende responder. A primeira questão é genérica e diz respeito ao Projeto baseado em Energia enquanto método de projetar. A segunda questão é específica e refere-se ao caso de estudo concreto do Projeto Digital de Envelopes de Edifícios.

#### ***PRIMEIRA QUESTÃO DE INVESTIGAÇÃO:***

***Sabendo-se que os edifícios são grandes consumidores de energia, será que se pode projetá-los de modo a que sejam também produtores de energia?***

## **SEGUNDA QUESTÃO DE INVESTIGAÇÃO:**

***Tendo em conta que a conceção arquitetónica geralmente não questiona o grande consumo energético dos edifícios, será que se pode ter um processo de projeto específico, nomeadamente o projeto do envelope dos edifícios, que torne os envelopes eficientes na captação de energia solar, de modo a que estes tenham a capacidade de produzir no mínimo a energia elétrica que os edifícios consomem?***

### **1.5 Hipótese de Investigação**

De modo a responder, em simultâneo, às duas questões de investigação, foi formulada uma hipótese de investigação:

***Será possível tornar os edifícios produtores de energia, orientando o projeto de arquitetura para uma procura de forma baseada na captação de energia solar, através de um sistema de projeto de envelopes de edifícios que permite conceber formas que maximizam a captação de energia solar no envelope, para diferentes contextos geográficos?***

Os objetivos do sistema de projeto pretendido são os seguintes:

- 1 - Permitir o projeto de formas para o envelope (cobertura e fachadas) dos edifícios que maximizem a capacidade de captação da energia solar, com a finalidade de transformar a energia solar captada em energia elétrica. Desse modo, contribui-se para um desempenho energético eficiente dos edifícios, procurando que a geração de energia seja no mínimo equivalente à energia consumida. Este objetivo conduz à criação do conceito de Projeto Digital de Envelopes de Edifícios;
- 2 - Estabelecer um sistema de projeto baseado em energia solar, ou seja, definir um sistema de projeto onde a energia solar sirva de base para estabelecer métodos e processos para a criação e transformação de forma, neste caso para o envelope de edifícios. Este objetivo torna possível testar

e comprovar o paradigma do Projeto baseado em Energia, proposto pela presente tese.

O sistema de projeto a desenvolver deverá ter também as seguintes características técnicas:

→ Deverá constituir um sistema digital, recorrendo às tecnologias digitais, entre as quais o computador, pela facilidade e rigor de desenho, modelação e transformação das formas projetadas, bem como pela capacidade de processamento de dados necessária para o cálculo do desempenho energético das formas projetadas;

→ O sistema digital de projeto proposto deverá estabelecer um enquadramento que permita articular o projeto geral de arquitetura de um edifício com o projeto do seu envelope. Designou-se o sistema proposto por sistema Arquitetura-Envelopes de Edifícios, em abreviatura, Sistema AE. O Sistema AE viabiliza o Projeto Digital de Envelopes de Edifícios;

→ O desenvolvimento do Projeto Digital de Envelopes de Edifícios proposto assenta na elaboração de uma gramática genérica discursiva, designada por Gramática de Envelopes de Edifícios, a qual se baseia nos conceitos de gramática da forma (Stiny 1980, 347), gramática descritiva (Stiny 1981, 257), gramática discursiva (Duarte 2001, 25) e gramática genérica (Beirão 2018, 225). A gramática genérica discursiva elaborada é uma gramática composta, formada por várias gramáticas paralelas articuladas entre si, as quais incluem várias gramáticas da forma e uma gramática descritiva. A gramática descritiva descreve as características das formas manipuladas nas diferentes gramáticas da forma. A gramática genérica discursiva proposta permite gerar e transformar um conjunto diversificado de formas para o envelope de edifícios;

→ O sistema de projeto proposto é concretizado através da elaboração de um instrumento prático de projeto, um protótipo de software, o qual auxilia o projetista na criação de formas eficientes para o envelope de edifícios, do ponto de vista do desempenho energético, ou seja, formas eficientes na captação de energia solar para a geração de energia elétrica. O

instrumento prático de projeto dá liberdade ao projetista para controlar o aspeto estético das formas projetadas.

O conjunto de objetivos e o conjunto de características técnicas formam o conjunto de fatores que definem o sistema de projeto pretendido e a hipótese de investigação. A hipótese de investigação elaborada conduz à formação do paradigma do Projeto baseado em Energia e do seu caso de estudo, o Projeto Digital de Envelopes de Edifícios.

## **1.6 Metodologia de Investigação**

Para a elaboração do sistema de projeto pretendido, desenvolveu-se uma metodologia de investigação composta por seis diferentes fases:

1. Fase analítica: Revisão de literatura e levantamento de conhecimento;
2. Fase de planeamento: Definição de uma visão e de uma linha de investigação para o Projeto baseado em Energia;
3. Fase projetual: Desenvolvimento do sistema de projeto;
4. Fase de implementação: Implementação do sistema de projeto em um protótipo de software;
5. Fase de teste: Projeto do envelope de duas tipologias de moradias unifamiliares;
6. Fase de reflexão: Reflexão crítica, conclusões e desenvolvimentos futuros da investigação realizada.

Procede-se de seguida com a descrição de cada uma das seis fases indicadas.

### **1. Fase analítica: Revisão de literatura e levantamento de conhecimento**

Na fase analítica, procedeu-se a uma revisão da literatura existente, de modo a se analisar o estado da arte nos temas relacionadas com a investigação. Foi revista literatura nos temas do projeto digital, projeto computacional, projeto generativo, projeto baseado em desempenho, gramáticas da forma, energia e

biologia. Em paralelo, realizou-se também um levantamento de conhecimento através do contacto com especialistas em áreas relacionadas com o tema de investigação, nomeadamente com os orientadores no que diz respeito ao projeto digital, ao projeto computacional, ao projeto generativo, às gramáticas da forma e à energia, e com outros especialistas no que se refere à ciência da computação e à computação gráfica.

## **2. Fase de planeamento: Sugestão de uma visão e de uma linha de investigação para o Projeto baseado em Energia**

É justificada a pertinência do Projeto baseado em Energia e indicados os principais campos do conhecimento onde a sua aplicação pode ser útil. Sugere-se uma visão e uma linha de investigação para este campo. Estabelece-se também um planeamento para a investigação neste campo, identificando as principais áreas cujo desenvolvimento poderá ser útil e benéfico para o ser humano e para a sociedade.

## **3. Fase projetual: Desenvolvimento do sistema de projeto**

De modo a comprovar o tema geral do Projeto baseado em Energia, estabeleceu-se um caso de estudo, o Projeto Digital de Envelopes de edifícios, para o qual se propõe um sistema de projeto digital. Tal sistema de projeto digital destina-se a suportar o projeto digital de envelopes de edifícios, mas pode servir também de modelo para a realização de outros tipos de projetos, como o projeto de envelopes de robots, por exemplo, que possam funcionar de acordo com o paradigma do Projeto baseado em Energia. São definidas uma metodologia e dois instrumentos conceptuais para o sistema de projeto pretendido. A metodologia em causa é composta por sete fases, de A a G, as quais permitem elaborar passo a passo o projeto para o envelope de um edifício. As fases da metodologia proposta ocorrem normalmente na sequência ABCDEFG, mas após definidas as fases A e B, as restantes fases podem ocorrer em diferentes sequências, de acordo com as intenções do projetista. A Fase A refere-se à definição do contexto (Contexto Legal, Contexto Ambiental, Programa e Espaço Interior) do edifício para o qual é feito o projeto do envelope. A Fase B diz respeito à definição da forma inicial do envelope do edifício e a Fase C à definição da

orientação do edifício. A Fase D está relacionada com a definição da forma final do envelope do edifício e a Fase E com a definição das zonas opacas, zonas não opacas e outras zonas do envelope do edifício. A Fase F diz respeito à definição das zonas de geração de energia e a Fase G à definição dos materiais de construção para o envelope do edifício. Para a concretização da metodologia descrita são utilizados dois instrumentos conceptuais: uma gramática genérica discursiva do envelope de edifícios, a qual se baseia no outro instrumento conceptual, o conceito teórico de algoritmo de forma, que permite em teoria projetar qualquer forma para o envelope de edifícios.

#### **4. Fase de implementação: Implementação do sistema de projeto em um protótipo de software**

O sistema de projeto, a sua metodologia e os seus instrumentos conceptuais (gramática genérica discursiva e algoritmo de forma) são concretizados através da elaboração de um instrumento prático de projeto, um protótipo de software, que auxilia o projeto de formas para o envelope dos edifícios, de modo a que estes tenham a capacidade de produzir no mínimo a energia que os edifícios consomem. Foi definido um método para a criação deste tipo de instrumentos práticos de projeto, o qual estabelece as seguintes fases:

- Implementação da gramática genérica discursiva, pelo investigador ou projetista autor da mesma, através de programação textual, em um ambiente de programação visual;
- Elaboração pelos projetistas de algoritmos por programação visual, a partir da gramática genérica discursiva elaborada;
- Exploração pelos utilizadores finais, os projetistas e/ou os clientes de um projeto, do programa e das soluções formais codificadas pelos algoritmos, em um interface gráfico simplificado, elaborado especificamente para ser utilizado de um modo simples, interativo, apelativo e intuitivo, pelos utilizadores finais.

O método em questão pode ser descrito do seguinte modo: a gramática genérica discursiva é implementada através de programação textual em um ambiente de

programação visual, permitindo depois a elaboração pelos projetistas de diferentes algoritmos para o envelope de edifícios. Após a elaboração dos algoritmos, as soluções formais por estes geradas podem ser exploradas de um modo interativo, apelativo e intuitivo, em um interface gráfico simplificado, pelos utilizadores finais do programa de computador.

### **5. Fase de teste: Projeto do envelope de duas tipologias de moradias unifamiliares**

Para demonstrar a viabilidade do sistema de projeto, da sua metodologia e dos seus instrumentos (gramática e protótipo de software), é realizado um projeto para o envelope de duas tipologias de moradias unifamiliares.

### **6. Fase de reflexão: Reflexão crítica, conclusões e desenvolvimentos futuros da investigação realizada**

São identificados os pontos fortes e os pontos fracos do sistema de projeto, da metodologia e dos instrumentos elaborados, refletindo e extraindo conclusões sobre a sua viabilidade. Reflete-se e conclui-se igualmente sobre a viabilidade do Projeto Digital de Envelopes de Edifícios e do Projeto baseado em Energia. São também indicadas as descobertas, as contribuições e os desenvolvimentos futuros da presente investigação.

## **1.7 Contribuições da Investigação**

As contribuições da investigação desenvolvida são apresentadas resumidamente a seguir, sendo mais detalhadas no capítulo que finaliza a tese. São três as principais contribuições da investigação desenvolvida:

### **1 - A definição de uma visão e de uma linha de investigação para a disciplina da Arquitetura, o Projeto baseado em Energia:**

O Projeto baseado em Energia incorpora a energia como elemento de conceção criativa na disciplina da Arquitetura. O Projeto baseado em Energia pode também ser aplicado às disciplinas do Urbanismo e do Design, pois o seu princípio fundamental, o de que a energia pode ser um elemento conceptual e criativo, é

válido para todas as disciplinas, sejam elas de âmbito mais artístico ou mais científico. É constituído um enquadramento teórico sobre a energia, que inclui os seguintes aspetos:

→ a importância que a energia teve e tem para o ser humano e para a sociedade ao longo da história;

→ algumas das áreas de atividade humana e das áreas tecnológicas onde se prevê que a energia possa assumir um papel fundamental para o desenvolvimento tecnológico e para o aumento da qualidade de vida do ser humano;

→ os aspetos em que a energia mais influência tem na área dos edifícios e a vantagem de incorporar a energia no processo de conceção em arquitetura. Neste âmbito, é também constituído um modelo teórico do tipo BEM (Building Energy Modeling) para instrumentos práticos, nomeadamente programas de computador, que suportem o projeto de arquitetura. O modelo tipo BEM consiste em um conceito que amplia o conceito de BIM (Building Information Modeling), caracterizando-se por destacar a energia como uma informação essencial para o processo de conceção em arquitetura e para a formação das soluções formais e construtivas dos edifícios. A partir do modelo teórico BEM desenvolvido, pretende-se desenvolver um programa de computador que aplique tal modelo no projeto de envelopes de edifícios e no projeto de arquitetura de edifícios.

## **2 - A definição de um campo de atuação e de um âmbito para o Projeto Digital de Envelopes de Edifícios, justificável na medida em que:**

1 – Os edifícios são responsáveis por 36% do consumo energético em todo o mundo (United Nations Environment and International Energy Agency 2017, 14), sendo o envelope a zona com maior impacto no consumo energético dos edifícios;

2 – A nível mundial, a aposta nas energias renováveis endógenas, como a energia solar, é crescente. Da análise dos dados publicados na Internet por

Ritchie e Roser (Ritchie e Roser, 2019), é possível verificar através da Figura 1.5 que em 2010 foram gerados e consumidos menos de 50 terawatts-hora (TWh) de energia em todo o mundo, proveniente do sol, enquanto que em 2016 esse valor já excedia 300 terawatt-hora, o que representa um crescimento de mais de 600% apenas em seis anos, no que diz respeito à geração e ao consumo de energia proveniente do sol.

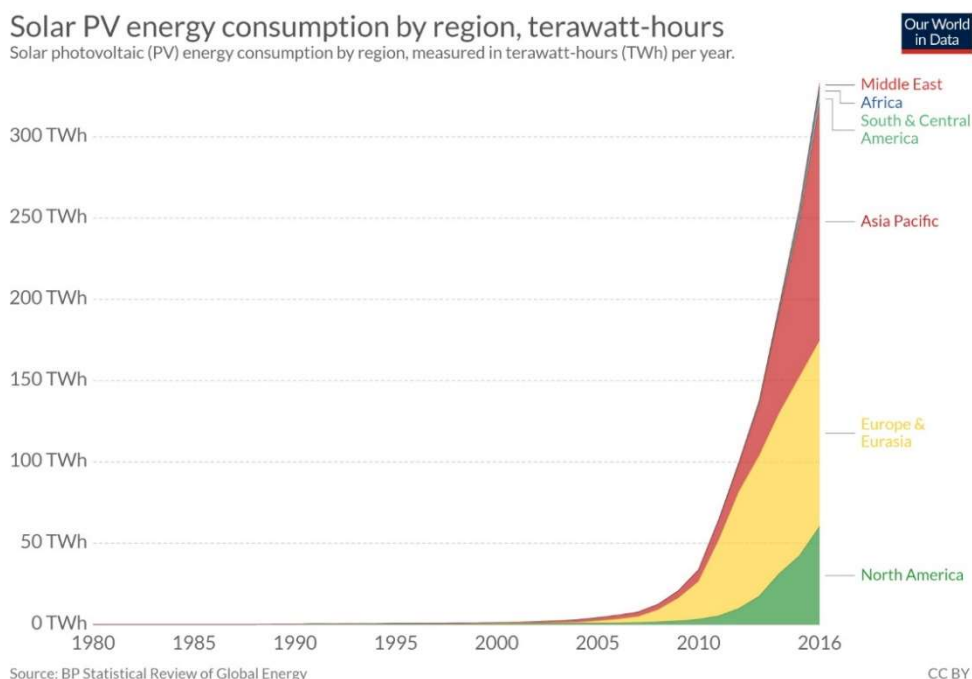


Figura 1.5: Consumo de energia solar fotovoltaica no mundo por região.  
(Ritchie e Roser, 2019)

Como tal, faz sentido projetar, construir e reabilitar o envelope dos edifícios de modo a torná-los mais eficientes não apenas no que se refere à diminuição do seu consumo energético, mas também no que diz respeito ao aumento da sua capacidade de geração de energia elétrica por meio da utilização de energias renováveis como a energia solar;

3 – Por ser fundamental, para o projeto de envelopes de edifícios eficientes, considerar a trajetória solar, o cálculo da energia solar incidente, o cálculo do consumo de energia no edifício e a geração e transformação da geometria do envelope, o que requer cálculos com algum nível de complexidade, é útil o recurso a meios digitais para este tipo de projeto, devido à elevada capacidade de processamento de dados de que os

computadores dispõem. Daí a designação deste tipo de projeto por Projeto Digital de Envelopes de Edifícios.

### **3 - A definição de um sistema, de uma metodologia, de dois instrumentos conceptuais e de um instrumento prático para o Projeto Digital de Envelopes de Edifícios:**

É definido na tese um sistema Arquitetura-Envelope de Edifícios (Sistema AE) que enquadra o Projeto Digital de Envelopes de Edifícios no âmbito mais vasto do projeto de Arquitetura, organizando e permitindo um simplificado fluxo de informação e de dados digitais entre estes dois tipos de projeto. Pretende-se que o sistema em causa possa ser adaptado e aplicado para o projeto de outros objetos que não o envelope de edifícios, como por exemplo o projeto de envelopes de robots. É também elaborada uma metodologia para o projeto digital de envelopes de edifícios, a qual estabelece de um modo flexível os passos e as fases a seguir para realizar este tipo de projeto. Para concretizar a metodologia proposta para o projeto digital de envelopes de edifícios no sistema Arquitetura-Envelopes de Edifícios sugerido, são criados os seguintes instrumentos conceptuais:

→ o conceito teórico de Algoritmo de Forma;

→ a Gramática do Envelope de Edifícios, baseada nos conceitos de gramática da forma, gramática descritiva, gramática discursiva e gramática genérica.

O conceito teórico de algoritmo de forma permite em teoria projetar qualquer forma para o envelope de um edifício, de modo a torná-lo eficiente na geração de energia elétrica, tendo em consideração o contexto ambiental, o contexto legal, o programa e o espaço interior de um edifício. A gramática do envelope de edifícios constitui um caso específico de um algoritmo de forma, formando uma gramática genérica discursiva, a qual permite a geração de diferentes gramáticas e formas para o envelope de edifícios, todas elas provenientes de uma mesma forma inicial. A principal diferença entre o conceito de algoritmo de forma e o de gramática do envelope de edifícios (a qual consiste em uma gramática genérica discursiva) consiste em que um algoritmo de forma não impõe restrições à forma

inicial, podendo as suas regras de transformação ser aplicadas a qualquer forma, enquanto que a gramática do envelope de edifícios (tal como uma gramática genérica discursiva) estabelece formas iniciais para as suas gramáticas da forma, aplicando também as mesmas regras de transformação que são estabelecidas através de um algoritmo de forma. A gramática do envelope de edifícios permite a criação de envelopes de edifícios que tenham a capacidade de produzir no mínimo a energia elétrica que os edifícios necessitam de consumir, através da exposição do envelope do edifício aos raios solares. A conversão da energia solar em energia elétrica é feita através da utilização de tecnologia fotovoltaica. São definidas para a gramática do envelope de edifícios operações que geram e transformam formas para o envelope de edifícios, de modo a que estas sejam eficientes na captação dos raios solares e na produção de energia elétrica. Através das operações definidas, é possível a criação de diferentes algoritmos, por meio da elaboração de diferentes sequências de operações, as quais permitem a geração e a transformação de diferentes formas para o envelope de edifícios.

De modo a que se possa utilizar de um modo eficiente, apelativo e intuitivo, a gramática do envelope de edifícios, foi iniciada a criação de um instrumento prático para o projeto digital de envelopes de edifícios, o protótipo de software LIDIA. LIDIA é o acrónimo de “Languages Interface for the Development of Intelligent Algorithms”, em português “Interface de Linguagens para o Desenvolvimento de Algoritmos Inteligentes”. O objetivo do protótipo de software LIDIA é constituir um programa, executado através do software Grasshopper (à semelhança de outros já existentes, como o Ladybug e o DIVA, por exemplo), que sirva como um “interface”, sendo o termo “interface” utilizado entre aspas porque o mesmo não é visível para o utilizador mas sim uma característica invisível do programa, o qual permite o contacto e a utilização de diferentes linguagens, visando o desenvolvimento de algoritmos para a geração de formas para o envelope de edifícios que sejam eficientes na produção de energia elétrica. Os algoritmos em questão são realizados através da implementação das operações, estabelecidas pela gramática do envelope de edifícios, em componentes de programação visual feitos especificamente para o LIDIA, os quais se encontram no software Grasshopper e foram elaborados através de

programação visual em Grasshopper e programação textual em Grasshopper Python Script Editor. As formas geradas e transformadas pelos algoritmos podem ser visualizadas no software Rhinoceros 3D. É pela interação que pretende estabelecer entre as linguagens do Rhinoceros 3D, do Grasshopper, do Grasshopper Python Script Editor, e de um interface simplificado de utilizador feito especificamente para o LIDIA, que se justifica a característica de “interface” e a designação de “Languages Interface”, em português “Interface de Linguagens”, do acrónimo LIDIA. Os algoritmos desenvolvidos através do LIDIA podem ser elaborados atualmente de um modo manual pelo projetista, mas é intenção que possam também vir a ser desenvolvidos futuramente de um modo automático, através de processos de inteligência artificial, daí a designação do LIDIA por “Languages Interface for the Development of Intelligent Algorithms”, em que a característica “Development of Intelligent Algorithms” refere-se precisamente à utilização de inteligência, a humana e/ou a artificial, para o desenvolvimento de algoritmos.

A definição do sistema, da metodologia e dos instrumentos para o Projeto Digital de Envelopes de Edifícios podem também ser úteis como uma referência de um método para a criação de outros instrumentos digitais, nomeadamente programas de computador, para além do LIDIA, os quais possam ser aplicados quer para o Projeto de Arquitetura, quer para o Projeto baseado em Energia.

A experimentação e validação do sistema, da metodologia e dos instrumentos elaborados para o Projeto Digital de Envelopes de Edifícios foi feita através da elaboração de um caso de estudo, o projeto digital do envelope para duas tipologias de moradias unifamiliares. Os resultados alcançados pelo projeto digital do envelope para as duas tipologias de moradias unifamiliares permitem validar a hipótese sugerida pela presente investigação, ou seja, a constituição do sistema, da metodologia e dos instrumentos elaborados para o Projeto Digital de Envelopes de Edifícios e, conseqüentemente, para o Projeto baseado em Energia, como uma resposta eficiente às duas questões da presente investigação: “Sabendo-se que os edifícios são grandes consumidores de energia, será que se pode projetá-los de modo a que sejam também produtores de energia?”, e “Tendo em conta que a conceção arquitetónica geralmente não

questiona o grande consumo energético dos edifícios, será que se pode ter um processo de projeto, em específico o projeto do envelope dos edifícios, que torne os envelopes eficientes na captação de energia solar, de modo a que estes tenham a capacidade de produzir no mínimo a quantidade de energia elétrica que os edifícios consomem?”.

As formas geradas e transformadas para o envelope das duas tipologias de moradias unifamiliares, através de algoritmos elaborados no protótipo LIDIA, alcançaram resultados eficientes, permitindo que os envelopes produzam mais energia elétrica do que aquela que os edifícios necessitam de consumir, fazendo-o também de um modo eficiente, ao minimizar a área do envelope que é necessária para a conversão dos raios solares em energia elétrica. As formas projetadas para o envelope das moradias consistem em formas estáticas e formas dinâmicas, alcançando ambos os tipos de formas resultados eficientes. As formas dinâmicas consistem em configurações do envelope dos edifícios que são mutáveis, ou seja, que mudam de forma, ao longo do dia e do ano, com o objetivo de melhor captar desse modo a irradiação solar incidente no envelope. As formas dinâmicas apresentaram em muitas das situações valores mais elevados de produção de energia elétrica do que as formas estáticas (ver Figura 7.19 do Capítulo 7), prevendo-se que possam constituir uma mais valia em muitas situação de projeto, para além do projeto das moradias unifamiliares que servem de caso de estudo na presente tese. Ou seja, as formas dinâmicas podem vir a revelar-se mais eficientes do que as formas estáticas, na produção de energia elétrica no envelope, para diferentes tipologias de edifícios. Não são apresentadas na presente tese soluções construtivas que permitem a concretização das formas dinâmicas projetadas para o envelope das moradias, pelo facto de a temática das soluções construtivas não estar no âmbito da presente tese. No entanto, pretende-se desenvolver futuramente essa temática, numa fase mais avançada de investigação sobre o Projeto baseado em Energia e sobre o Projeto Digital de Envelopes de Edifícios.

## 1.8 Organização da Tese

O presente Capítulo 1, “Sobre o Projeto baseado em Energia: uma introdução”, introduz o tema geral abordado na tese, o Projeto baseado em Energia, descrevendo o seu contexto e pertinência no âmbito da sociedade contemporânea e da investigação científica. Num âmbito mais específico e como caso de estudo que suporta o tema geral, descreve-se também o enquadramento do tema específico da tese, o Projeto Digital de Envelopes de Edifícios.

O capítulo 2, “Estado da Arte”, indica e referencia alguns dos principais trabalhos de investigação elaborados até à atualidade que servem de referência para a investigação realizada na presente tese, no que diz respeito à relação entre forma e energia, aos processos de projeto, e ao modo como a energia tem sido abordada no projeto de arquitetura de edifícios, visando a construção e a reabilitação de edifícios com um eficiente desempenho energético.

No capítulo 3, “Projeto baseado em Energia: Visão e Linha de Investigação proposta”, são descritos o tema geral da tese, o Projeto baseado em Energia, bem como a visão e a linha de investigação proposta, justificando a sua pertinência tendo em conta a importância que a energia teve quer ao longo da história, quer atualmente no funcionamento e bem-estar da sociedade contemporânea. Tal importância é visível em diferentes campos do conhecimento e em diferentes atividades humanas, tais como na arquitetura, na medicina, na computação, na robótica, nos transportes, na construção, nos espaços públicos, nos edifícios, no mobiliário, entre outros. No âmbito da presente tese, é focada a utilização da energia em edifícios, indicando-se os principais aspetos e utensílios onde a mesma é consumida, bem como as vantagens de gerar a energia que os edifícios consomem através do próprio envelope dos mesmos, recorrendo a fontes de energia renováveis.

O Capítulo 4, “Projeto Digital de Envelopes de Edifícios: Âmbito, Sistema, Metodologia e Instrumentos”, inicia o tema específico da tese, o projeto digital de envelopes de edifícios, e define um sistema, uma metodologia e dois instrumentos conceptuais para o projeto digital de envelopes de edifícios. É

justificado o uso de meios digitais e o recurso ao computador enquanto instrumentos de suporte ao projeto, pela sua facilidade e rapidez de cálculo, necessários para o cálculo da trajetória solar (a qual varia consoante a localização geográfica do edifício), para o cálculo estimado da geração de energia no edifício e para a geração da geometria do envelope do edifício.

O Capítulo 5, “Gramática do Envelope de Edifícios”, descreve a elaboração de um dos instrumentos conceptuais referidos no capítulo 4, a Gramática do Envelope de Edifícios, a qual se baseia nos conceitos de gramática da forma, gramática descritiva, gramática discursiva e gramática genérica, servindo como instrumento conceptual para o projeto de envelopes de edifícios. A gramática elaborada permite a conceção de diferentes formas possíveis para os envelopes, visando que todas elas sejam eficientes do ponto de vista da produção de energia elétrica nos edifícios.

O capítulo 6, “LIDIA: Protótipo de um software para suporte ao projeto digital de envelopes de edifícios”, relata a implementação da gramática referida no capítulo anterior num protótipo de software, o qual se constitui como um instrumento prático de projeto. O objetivo consiste em que tal software possa ser utilizado para a geração de formas para o envelope de edifícios, as quais sejam eficientes na captação dos raios solares e na produção de energia elétrica nos edifícios. É fornecida ao utilizador do software informação gráfica sobre a energia solar incidente nas formas geradas, de modo a que este possa decidir alterar ou não as formas geradas e optar pelas que considere mais satisfatórias.

No capítulo 7, “Projeto digital do envelope de duas tipologias de moradias unifamiliares”, são aplicadas a gramática e o protótipo de software, no projeto do envelope de duas tipologias de moradias unifamiliares para um lote urbano vago na cidade de Lisboa, servindo esse projeto como um caso de estudo para a presente tese. São aplicados e testados em concreto a metodologia e os instrumentos elaborados para o Projeto Digital de Envelopes de Edifícios, validando-se os mesmos.

A finalizar, no capítulo 8, “Conclusões”, é feito um resumo dos capítulos anteriores, destacando-se o conteúdo essencial da tese. É elaborada uma reflexão sobre a investigação realizada, listando-se as descobertas, as contribuições e os desenvolvimentos futuros previstos no âmbito dos temas do Projeto Digital de Envelopes de Edifícios e do Projeto baseado em Energia.

## 1.9 Referências do Capítulo 1

**Beirão J., Duarte J.P.** 2018. "Generic grammars for design domains". *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing* 32: 225-239.

**Castro e Costa, Eduardo.** 2018. "Managing Complexity in Mass Customization through Design Space Subdivision: a Case Study in Ceramic Tableware Design". PhD dissertation. The Pennsylvania State University, State College, Pennsylvania, United States of America.

**Fuller, Richard Buckminster.** 1975. *Synergetics. Explorations in the Geometry of Thinking*. London: Macmillan Publishing.

**IAPMEI, FCT, ADI, COMPETE, QREN and UNIÃO EUROPEIA.** 2013. "Estratégia Nacional de Investigação e Inovação para uma Especialização Inteligente 2014-2020. Diagnóstico de Apoio às Jornadas de Reflexão Estratégica. Eixo Temático I – Tecnologias Transversais: Energia".

**Kalay, Yehuda.** 1999. "Performance-based design". *Automation in Construction* 8: 395-409.

**Oxman, Neri.** 2010. "Material-based Design Computation". PhD dissertation. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts, United States of America.

**Ritchie, Hannah e Max Roser.** 2019. *Renewable Energy*. Acedido a 25 de Julho de 2019. <https://ourworldindata.org/renewable-energy> [Recurso Online]

**Sagan, Carl.** 1980. *Cosmos*. Random House.

**Stiny, George.** 1980. "Introduction to shape and shape grammars". *Environment and Planning B* 7: 343-351.

**Terzidis, Kostas.** 2006. *Algorithmic Architecture*. Great Britain: Architectural Press.

**Thompson, D'Arcy Wentworth.** [1942] 1992. *On Growth and Form. The Complete Revised Edition*. New York: Dover Publications.

**United Nations Environment and International Energy Agency.** 2017. "Towards a zero-emission, efficient and resilient buildings and construction sector". Global Status Report 2017.



# **CAPÍTULO 2**

## **Estado da Arte**



## CAPÍTULO 2

### Estado da Arte

Procede-se neste capítulo a uma revisão da literatura mais relevante nos campos do conhecimento relacionados com a presente investigação. O objetivo consiste em contextualizar a atual investigação. A literatura em questão encontra-se organizada em três áreas principais. A primeira área diz respeito aos processos de análise da forma e aos processos de projeto que constituem referência para o processo de projeto que se pretende desenvolver, a segunda área à energia no processo de projeto e a terceira área à relação entre a energia e as gramáticas da forma.

#### **2.1 Processos de análise da forma e processos de projeto**

Duas áreas do conhecimento constituíram fonte de inspiração para a presente investigação: os processos de análise da forma, oriundos das Ciências Naturais, da Biologia e das Ciências do Artificial, e os processos de projeto, nomeadamente a Computação de Projeto baseada em Materiais. Foi da sinergia estabelecida entre estas duas áreas que se formou a ideia do Projeto baseado em Energia. Analisam-se de seguida os conceitos recolhidos destas duas áreas do conhecimento.

##### **Processos de análise da forma, oriundos das Ciências Naturais, da Biologia e das Ciências do Artificial:**

As Ciências Naturais são as ciências que estudam os processos e as coisas que existem na natureza. A Biologia é um campo específico das Ciências Naturais, constituindo uma ciência que estuda a vida e os seres vivos, existentes na natureza. Na obra *“On Growth and Form”* de D’Arcy Thompson, do campo da Biologia, assume particular interesse a investigação em como as formas dos seres vivos, bem como as das partes dos seres vivos, podem ser explicadas por considerações físicas, e perceber que no geral não existem formas orgânicas

que não estejam em conformidade com as leis físicas e matemáticas (Thompson 1992, 15).

As formas dos seres vivos, e mesmo as dos seres não vivos, são o resultado de processos existentes na Natureza. Compreender como funcionam esses processos permite compreender a forma das coisas. E relacionar as próprias coisas entre si (Figura 2.1).

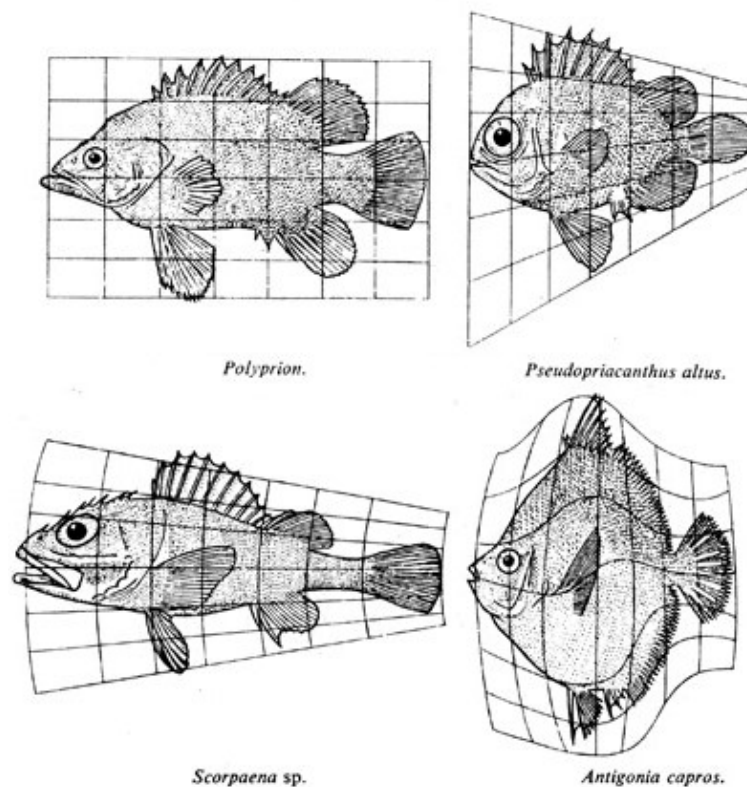


Figura 2.1: Formas de diferentes espécies de peixes e relações entre as mesmas.

(adaptada de Thompson [1942] 1992, 1063)

A física constitui a ciência que se ocupa do estudo de tais processos, os quais se podem designar por processos energéticos, uma vez que se tratam de processos de transferência e de transformação de energia. Tendo a energia um carácter plural (energia eletromagnética, energia gravítica, energia nuclear, energia mecânica, energia química), a física clássica adota o termo abstrato de força no sentido de sintetizar o carácter diverso da energia num só termo. A força aplica-se assim sobre uma determinada coisa material, exercendo uma ação sobre a mesma.

Já a morfologia, entende-se normalmente como sendo a ciência da forma das coisas materiais, forma essa que é habitualmente entendida como fixa. No entanto, o âmbito da morfologia é mais amplo, relacionando-se com os aspetos da força e da energia. Citando de novo D'Arcy Thompson:

*“ Morphology is not only a study of material things and of the forms of material things, but has its dynamical aspect, under which we deal with the interpretation, in terms of force, of the operations of Energy\*.”*

*“ \* This is a great theme. Boltzmann, writing in 1886 on the second law of thermodynamics, declared that available energy was the main object at stake in the struggle for existence and the evolution of the world.”*

*(Thompson 1942 [1992], 19)*

O estudo da forma e da morfologia encontra-se deste modo intimamente ligado ao estudo da energia. A diferentes formas correspondem diferentes energias ou desempenhos energéticos. Sendo este facto válido em diferentes escalas, desde a do universo à do átomo, passando pela da célula:

*“ Within the cell, chemical forces are at work, and so also in all probability (to judge by analogy) are electrical forces; and the organism reacts also to forces from without; that have their origin in chemical, electrical and thermal influences.” (Thompson 1942 [1992], 18)*

Compreender a forma, a energia e o modo como estas se influenciam mutuamente, pode porventura levar à descoberta de novas formas e novas energias que melhorem diversos aspetos da vida do ser humano, como por exemplo os edifícios em que este habita.

Também no que diz respeito aos processos de análise da forma e à sua relação com a energia, interessa ainda referenciar o trabalho de Herbert Simon, na sua obra *“As Ciências do Artificial”*. Aí, são apresentadas análises que se aplicam quer às coisas artificiais, quer às coisas naturais em geral e às coisas biológicas em específico. Simon defende que um determinado artefacto pode ser pensado como um ponto de encontro – um interface nos termos atuais – entre um

ambiente interno, a substância e a organização do próprio artefacto, e um ambiente externo, os arredores, nos quais ele opera. Se o ambiente interno for apropriado para o ambiente externo, ou vice-versa, o artefacto servirá o propósito pretendido (Simon 1969, 7). Esta ideia é reforçada e aplicada à biologia e aos seres vivos do modo como se explica de seguida.

*“ Notice that this way of viewing artifacts applies equally well to many things that are not man-made, to all things in fact that can be regarded as adapted to some situation; and in particular it applies to the living systems that have evolved through the forces of organic evolution. A theory of the airplane draws on natural science for an explanation of its inner environment (the power plant, for example), its outer environment (the character of the atmosphere at different altitudes), and the relation between its inner and outer environments (the movement of an air foil through a gas). But a theory of the bird can be divided up in exactly the same way. ” (Simon 1969, 7)*

Ou seja, é a relação entre os ambientes interno e externo de um dado corpo que determina o comportamento e o desempenho de tal corpo, seja este um corpo artificial ou natural. No exemplo do avião referido por Simon, o aerofólio (o perfil em secção das asas) do avião move-se ao longo do seu trajeto pelos gases da atmosfera, tendo repercussões no comportamento do motor. O motor ajusta a energia que fornece ao avião consoante a forma que o aerofólio adota ao longo do seu trajeto pela atmosfera. O avião pode desse modo ser entendido como um interface entre o ambiente interior que o caracteriza, determinado em larga medida pelo seu motor, e o ambiente exterior que o rodeia, a atmosfera. A forma desse interface, do avião, relaciona-se com a interação que ocorre entre o ambiente interior e o ambiente exterior do avião, visando um eficiente desempenho do objetivo pretendido, o qual consiste na movimentação do avião ao longo da atmosfera.

Importa também salientar que os fatores que mais influência têm quer no ambiente interno, quer no ambiente externo, são fatores energéticos: a energia do motor para movimentar o avião, no ambiente interno, e os processos

energéticos que ocorrem na atmosfera tais como as movimentações de gases, no ambiente externo. A forma do corpo do avião permite assim um eficiente desempenho de movimento no contexto da interação energética que ocorre entre a energia cinética fornecida pelo motor e a energia da pressão atmosférica exercida sobre o corpo do avião. A relação que é estabelecida entre forma e energia no corpo do avião ou outro objeto artificial pode também ser estabelecida para objetos naturais (objetos inanimados existentes na Natureza, tais como a terra e a água) e para objetos biológicos, tal como o exemplo, sugerido por Simon, de um pássaro. A diferença essencial de um pássaro relativamente a um avião consiste nas características do ambiente interno que os definem. Elementos como o motor e o sistema mecânico que o motor controla no ambiente interno do avião dão lugar a elementos como o coração e o sistema muscular no ambiente interno do pássaro. A forma do corpo do pássaro advém assim da interação que ocorre entre o seu ambiente interno e a atmosfera que o rodeia, visando o eficiente desempenho dos seus objetivos, entre os quais um se destaca: o de voar.

Outra obra que se debruça sobre a análise da forma, nomeadamente sobre os processos que originam a forma das coisas existentes na natureza, e o modo como esses processos se podem aplicar nas atividades de projeto e de design, é o trabalho desenvolvido por Peter Pearce em *“Structure in Nature is a Strategy for Design”*.

Pearce refere que todas as formas da natureza são determinadas pela interação de forças intrínsecas com forças extrínsecas. Forças intrínsecas são aqueles fatores que são inerentes a qualquer sistema estrutural em particular; isto é, são as propriedades internas de um sistema que governam os seus possíveis arranjos e o seu potencial desempenho (Pearce 1990, xiv). Forças extrínsecas são aquelas influências governativas que são externas a qualquer sistema estrutural em particular. São o inventário de fatores, em grande parte ambientais, que dão direção às opções de forma permitidas pelas inerentes propriedades combinatórias, ou de atribuição de forma, de um determinado sistema estrutural (Pearce 1990, xv).

É indicado como exemplo o caso de um floco de neve:

*“ The snowflake typifies all crystalline orderings. The possible external shape options that a given crystal may take are controlled by the internal symmetry of the atomic arrangement; that is, by the system with which the atoms themselves are arranged. The particular local form of a given crystal is determined by the interaction of external environmental factors (e.g. temperature, humidity, etc.) with the inherent principles governing the atomic arrangements. A given crystalline substance may take a variety of shapes; but certain limits to form, usually expressed as angular relationships, are governed by the inherent form-giving properties (the intrinsic force system) of the atomic arrangement. ” (Pearce 1990, xv)*

Também no exemplo do floco de neve indicado por Pearce, a energia, ou os processos energéticos, constituem um fator determinante na definição da forma de um floco de neve. É da interação entre os processos energéticos externos ao floco de neve, as forças extrínsecas, e os processos energéticos que ocorrem na estrutura atômica interna do floco de neve, as forças intrínsecas, que surge a forma do floco de neve. Os processos energéticos externos consistem nas condições climáticas (definidas por elementos como a radiação solar, a temperatura, a humidade, a pressão atmosférica, entre outros) existentes no local onde o floco de neve se encontra, e os processos energéticos internos consistem na energia de ligação química que existe entre os átomos da estrutura cristalina do floco de neve.

Aplicando a mesma lógica ao projeto ou ao design de algo, como por exemplo ao projeto de um edifício, as influências que são externas às propriedades inerentes de um sistema construtivo para a atribuição de forma a um edifício, constituem um conjunto de forças extrínsecas e definem o critério para a criação da forma do edifício.

Este conjunto de forças extrínsecas incluem, segundo Pearce: (a) condições ambientais predominantes de temperatura, vento, humidade, a relação geométrica entre a terra e o sol, e as variações destes elementos; (b) limitações

de recursos, incluindo energia e materiais; (c) condições topográficas; (d) condições geológicas; (e) função do edifício, incluindo a mudança do seu uso ao longo do tempo; (f) relação com a comunidade; e (g) ambiente emocional (Pearce 1990, xvi).

A definição de uma forma eficiente para um edifício, como resposta a essas forças extrínsecas, sugere que o sistema construtivo para um edifício incorpore um conjunto de forças intrínsecas, as quais determinam as propriedades inerentes do sistema construtivo. Essas propriedades inerentes incluem a habilidade do sistema construtivo em: (a) conformar-se a arranjos de energia potencial mínima, isto é, eficiência estrutural relativa ao uso de materiais; (b) providenciar diversidade de formas de modo a responder (adaptar-se) eficientemente às ações de uma matriz de forças extrínsecas; (c) acomodar mudanças como resposta às inevitáveis variações de longo termo de certas forças extrínsecas; (d) definir um inventário mínimo de tipos de componentes, de modo a simplificar e economizar a produção e uso do sistema; (e) tirar vantagem de materiais que sejam consistentes com uma resposta ótima às ações das forças extrínsecas e à produção económica dos componentes do sistema; e (f) utilizar métodos de produção que permitam que os componentes possam ser produzidos de um modo económico (Pearce 1990, xvi).

Conforme se constata, é da relação que se estabelece entre as forças extrínsecas e as forças intrínsecas que se estabelece a forma para um edifício. As forças extrínsecas provocam a seleção, dentro do leque de formas possibilitado pelas forças intrínsecas, da forma ou das formas mais adequadas para um edifício, tendo em conta o local geográfico e o contexto ambiental, social e económico onde este se implanta.

### **Processos de projeto, nomeadamente a Computação de Projeto baseada em Materiais:**

Antes da integração dos computadores no processo de projeto em arquitetura, o arquiteto iniciava o processo de projeto gerando a forma geométrica, à qual posteriormente atribuía um conjunto de materiais, procedendo também a algumas análises estruturais e ambientais. Este processo implica que se comece

a projetar através da forma. Os programas de Desenho Assistido por Computador (CAD, computer-aided design) foram tipicamente desenvolvidos para suportar processos de automatização de projeto mas, curiosamente, não alteravam significativamente o processo de projeto; apenas o tornaram mais fácil e mais rápido (Oxman 2010, 124).

A Natureza e o mundo dos materiais naturais operam de modo bastante diferente, pois a forma é apenas um subproduto da atribuição de parâmetros materiais aos processos ambientais. As formas e os materiais naturais caracterizam-se pela sua capacidade para negociar entre múltiplos critérios de desempenho, de modo a gerar objetos personalizados, convenientemente adequados ao seu meio. Além disso, caracterizam-se também pela não separação entre os seus processos de geração de forma, avaliação e fabricação (Oxman 2010, 125).

Tendo em conta as mais valias dos processos e dos produtos da Natureza, como sejam a eficiência dos materiais e o nível elevado de personalização pela adequação ao meio, é natural que se investiguem novos processos de projeto que promovam essas mesmas mais valias. A Computação de Projeto baseada em Materiais é um desses novos processos, procurando integrar as propriedades dos materiais e as condições ambientais dentro dos processos computacionais de geração de forma (Figura 2.2). Constitui desse modo uma abordagem inovadora aos processos e programas de CAD e aos processos de projeto, em geral.

*“ We assume that if we were able to compute the distribution of matter as a function of structural and environmental performance, we would be able not only to control substance variation defined per a given boundary condition, but better still, we could utilize such methods for the generation of form itself. ” (Oxman 2010, 85)*



Figura 2.2: Monocoque 2. (Oxman 2018) Este objeto, criado segundo o processo da Computação de Projeto baseada em Materiais, concretiza uma técnica de construção que suporta a carga estrutural do objeto, utilizando o seu envelope externo. Ao contrário do projeto tradicional dos envelopes de edifícios, o qual faz a distinção entre estrutura e elementos de preenchimento ou revestimento do envelope, esta abordagem integra esses dois componentes, promovendo a heterogeneidade e a diferenciação das propriedades do material utilizado. A distribuição das linhas de tensão é incorporada na localização e espessura relativa dos elementos semelhantes a veias construídos dentro do envelope do objeto.

A Computação de Projeto baseada em Materiais procura assim constituir-se como um processo de projeto que se assemelha ao da Natureza, concebendo e fabricando produtos mais eficientes do ponto de vista material e com um elevado nível de adequação ao meio. Fá-lo, colocando os materiais, e as propriedades dos mesmos, como um fator determinante para o projeto de produtos. Inclusivamente, para a geração da forma dos produtos que estão a ser projetados. Estabelece assim uma relação e uma influência mútua direta entre o material e a forma, durante o processo de projeto.

## 2.2 A energia no processo de projeto

O modo como a energia tem sido abordada no processo de projeto, aqui considerado somente no que diz respeito à Arquitetura por esta ser a disciplina em destaque na presente tese, pode ser enquadrado em quatro fases distintas.

A primeira fase integra desde as primeiras construções do ser humano até aos modos de projetar e construir ditos tradicionais, as quais se prolongam essencialmente até à época da Revolução Industrial (século XVIII). Nessa fase, os aspetos energéticos estavam, de um modo inconsciente, diretamente integrados no processo de conceção dos edifícios. Os edifícios eram concebidos e construídos tendo-se maior ou menor grau de atenção, consoante a sensibilidade dos projetistas e construtores, em garantir níveis de temperatura e de iluminação adequados nos edifícios.

A segunda fase verifica-se desde a época da Revolução Industrial, evoluindo no período do Modernismo (início do século XX) e terminando com o início do Pós-Modernismo (desde a segunda metade do século XX), quando emergem as preocupações com as culturas locais e com o ambiente. Esta segunda fase caracteriza-se por ser uma época onde o conhecimento científico cresce de um modo significativo e onde a produção de bens pela indústria reflete isso mesmo, produzindo-se nas fábricas produtos padronizados de diferentes tipos. A diversidade de saberes, produtos e serviços que a Revolução Industrial permitiu, provocou também uma crescente especialização em muitos domínios do saber, promovendo o surgimento de novas profissões. A arquitetura e a construção tiveram alterações significativas, vendo o seu processo de trabalho ser fragmentado, dando origem a diferentes atividades desempenhadas por variados profissionais tais como o arquiteto, o engenheiro e o construtor (Mateus et al. 2015, 1). Anteriormente, o arquiteto reunia na sua figura as responsabilidades do projeto e da construção. A partir da Revolução Industrial, foram surgindo gradualmente as profissões do engenheiro, para os projetos das componentes técnicas dos edifícios, e do construtor, para a construção e para a gestão da construção dos edifícios.

É pois nessa altura que emerge de um modo consciente o aspeto da energia nos edifícios, temática essa que é abordada de uma forma científica pelos engenheiros, numa fase de projeto posterior à fase de conceção dos edifícios. As medidas energéticas relacionavam-se com o facto de garantir os níveis adequados de temperatura, iluminação, ventilação e acústica no interior dos edifícios. Tais medidas eram asseguradas pelos materiais aplicados na construção dos edifícios, mas também por tecnologias inventadas na época, tais como a iluminação elétrica (que introduziu a iluminação artificial) e o ar condicionado (que permitiu o aquecimento, o arrefecimento e a ventilação artificial). A introdução de tais tecnologias nos edifícios permitiu garantir o conforto no interior dos edifícios numa fase posterior à conceção arquitetónica dos mesmos.

A terceira fase corresponde à época inicial do Pós-Modernismo (desde a segunda metade até ao final do século XX). É nesta altura que se começam a discutir e a abordar de modo mais intenso as temáticas do ambiente e da sustentabilidade, como reação aos excessos cometidos durante o Modernismo, onde se assistiu a um fenómeno intenso de construção, muita da qual desadequada face ao seu contexto ambiental, social e económico. Esta época caracteriza-se por uma crescente preocupação em projetar os edifícios de modo sustentável, ou seja, tendo em atenção o ambiente e as condições sociais e económicas do local para onde os edifícios são projetados.

A energia é considerada como uma componente dos aspetos ambientais, sendo a sua ciência estudada e divulgada no âmbito do projeto de edifícios. Verifica-se deste modo um regresso dos aspetos energéticos ao processo de conceção dos edifícios, mas agora de um modo mais consciente, quando comparado com os métodos de projeto e de construção tradicionais. São estabelecidos os princípios físicos relevantes (calor, luz e som) para a energia em edifícios, relacionando-se os mesmos com as necessidades do conforto humano. Os métodos de controlo de tais princípios físicos energéticos nos edifícios são distinguidos entre métodos passivos e ativos. Os métodos passivos referem-se aqueles que são elaborados durante a conceção dos edifícios (tal como a localização e a dimensão das janelas para a entrada de luz), enquanto que os métodos ativos consistem nos

que dizem respeito ao projeto e à instalação de dispositivos, habitualmente feitos numa fase posterior à conceção dos edifícios (instalação de ar condicionado, por exemplo). Assiste-se assim nesta época a uma crescente tendência de integrar os princípios físicos energéticos e os métodos de controlo dos mesmos, os passivos e os ativos, na conceção dos edifícios. Nesta fase, a ênfase estava em como poderiam estes ser considerados no projeto de edifícios (Szokolay 2008, xi).

A quarta e última fase desenvolve-se desde o final do século XX até aos dias de hoje, primeiro quarto do século XXI. Constitui de certo modo uma extensão da terceira fase, onde predominam as atenções dadas às culturas locais, ao ambiente e à sustentabilidade. Optou-se contudo por distinguir esta quarta fase da terceira, pelo facto de se verificarem a partir do final do século XX dois fatores que influenciaram de modo determinante os métodos de projeto, fatores esses que se encontram em desenvolvimento na atualidade. São eles o *performance-based design* (o projeto baseado em desempenho) e os processos de projeto baseados em computador. No projeto baseado em desempenho considera-se que a força motriz por trás de qualquer atividade de projeto é o desejo de obter uma solução qualitativa para uma combinação particular de forma e função em um contexto específico. Além disso, considera-se que a qualidade só pode ser determinada por uma avaliação de desempenho multicritério e multidisciplinar, o que compreende uma soma ponderada de várias funções de satisfação-comportamento (Kalay 1999, 395). Já os processos de projeto baseados em computador consistem em processos que utilizam o computador na conceção de soluções para o projeto de objetos tais como os edifícios. Tratam-se de processos que recorrem à computação como um instrumento essencial para o projeto, ou seja, a computação é considerada como um elemento que permite estender o intelecto humano (Terzidis 2006, xi), suportando e estimulando a criatividade na procura de uma ou mais soluções de projeto.

No que diz respeito ao modo como a energia é atualmente abordada no processo de projeto, destacam-se dois modos distintos de atuação: um primeiro que efetua análises do desempenho energético do edifício, através do computador, durante a fase de conceção do projeto do edifício, à medida que o projetista concebe e

modela o edifício; e um segundo que combina os dois fatores acima indicados, o projeto baseado em desempenho e os processos de projeto baseados em computador, para projetar soluções com um desempenho energético otimizado para o edifício pretendido. O primeiro modo de atuação consiste num método convencional de projeto, em que o projetista repete continuamente um ciclo de modelação de geometria seguida de análise, até alcançar um resultado que considere satisfatório para a forma e para o desempenho energético do edifício. Já o segundo modo de atuação, estabelece uma abordagem mais inovadora às metodologias de projeto, em que os processos de projeto baseados em computador, como por exemplo os algoritmos genéticos, são utilizados de modo a se obterem soluções para o projeto de edifícios que alcancem de modo mais ou menos automático o desempenho pretendido pelo projetista. Entre os desempenhos pretendidos encontra-se o desempenho energético, descrito em componentes tais como o consumo e a geração de energia no edifício, as necessidades de aquecimento e arrefecimento, as necessidades de iluminação e o isolamento sonoro. Encontram-se assim, através de um processo de otimização que utiliza a computação, soluções para o edifício que alcançam o desempenho energético pretendido.

Neste último âmbito, interessa referir o trabalho de Luísa Caldas. A sua tese de doutoramento “An Evolution-Based Generative Design System: Using Adaptation to Shape Architectural Form” propõe um Sistema de Projeto Generativo que utiliza conceitos evolucionários para incorporar paradigmas de adaptação no processo de projeto arquitetónico (Caldas 2001, 1). O sistema generativo usa um algoritmo genético como mecanismo de pesquisa e otimização (Caldas 2001, 3) das soluções formais para um edifício. É feita também uma avaliação das soluções geradas em termos do seu desempenho ambiental, no que se refere a critérios como o custo dos materiais de construção e o consumo anual de energia nos edifícios. O sistema generativo de Caldas é utilizado para gerar geometrias completas de edifícios, partindo de relações abstratas estabelecidas entre elementos de projeto, fazendo uso da adaptação para fazer evoluir a forma arquitetónica. Experiências de geração de forma são desempenhadas para diferentes localizações geográficas, testando a capacidade dos algoritmos elaborados para adaptar a forma arquitetónica a diferentes ambientes. O

principal objetivo consiste pois em ajudar os arquitetos a melhorar o desempenho ambiental dos edifícios projetados.

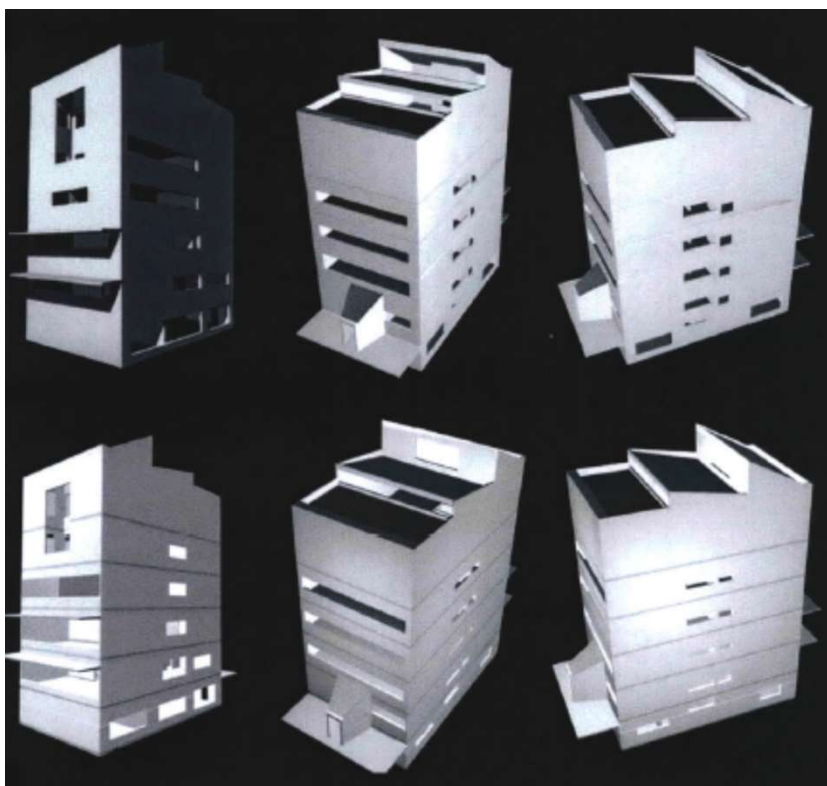


Figura 2.3: Imagens de modelos 3D de um edifício da Faculdade de Arquitetura do Porto, da autoria do Arqº Álvaro Siza Vieira. Em cima, apresenta-se um modelo 3D das soluções de Siza para as configurações dos vãos do edifício. Em baixo, apresenta-se um modelo 3D das soluções geradas pelo sistema generativo de Caldas. (Caldas 2001, 155)

A figura 2.3 ilustra um exemplo das soluções formais geradas pelo sistema generativo de Caldas para a configuração dos vãos de um dos edifícios projetados pelo Arqº Siza Vieira para a Faculdade de Arquitetura do Porto, de modo a melhorar o desempenho do edifício no que diz respeito a fatores como a iluminação natural e a temperatura no interior do edifício.

O trabalho de Michela Turrin também merece destaque, nomeadamente a sua tese de doutoramento “Performance Assessment Strategies: A computational framework for conceptual design of large roofs”. PAS (Performance Assessment Strategies), em português Estratégias de Avaliação de Desempenho, é o principal contributo da sua investigação, a qual consiste no estabelecimento de uma estrutura e de uma metodologia que inclui orientações e uma extensa

biblioteca de procedimentos para modelação paramétrica, tendo em vista o desempenho na fase conceptual de projeto. O problema investigado está relacionado com o facto de que as atuais ferramentas e métodos para o projeto conceptual assistido por computador em arquitetura não revela explicitamente nem permite o retrocesso das relações entre o desempenho e a geometria gerada pelo projeto. Apenas suportam processos de pós-engenharia, em vez de decisões iniciais de projeto e o processo de exploração de soluções em projeto.

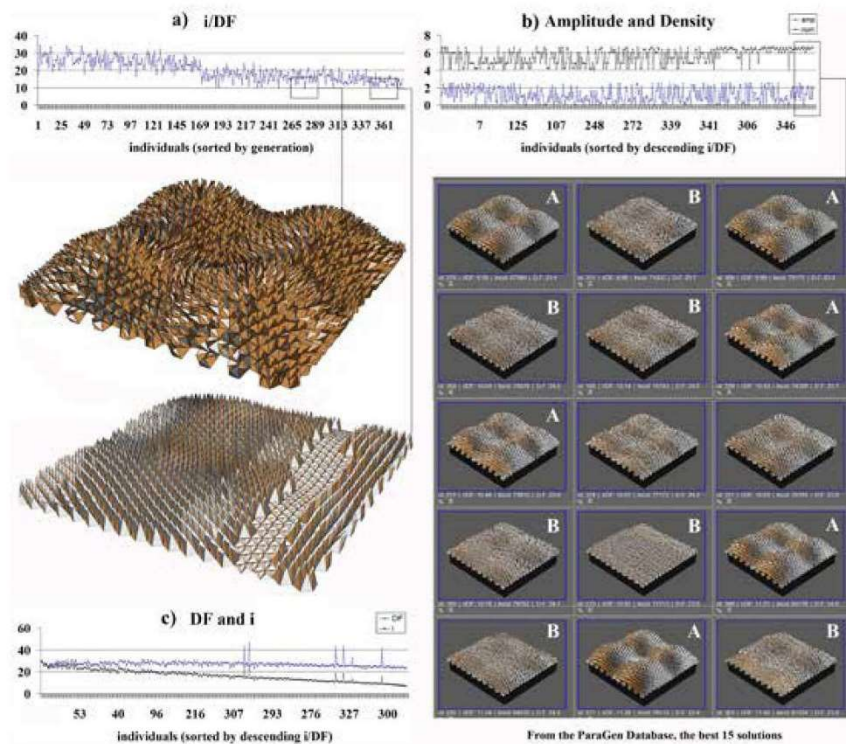


Figura 2.4: Exploração de soluções de projeto otimizadas através de uma ferramenta para exploração de soluções paramétricas, o ParaGen, a qual integra o PAS (Performance Assessment Strategies) proposto por Turrin. A secção a) mostra em gráfico as soluções de projeto geradas para uma cobertura, através de algoritmos genéticos, procurando que a relação entre a irradiação solar incidente na cobertura (i) e o fator de iluminação (DF) tenha o menor valor possível, de modo a que para qualquer valor de irradiação solar incidente o valor do fator de iluminação no interior do edifício seja o mais elevado possível. A secção a) mostra também a imagem de duas soluções otimizadas para a cobertura, ou seja, para o valor da irradiação incidente, o valor da iluminação no interior do edifício é o máximo possível. A secção b) ilustra 15 diferentes imagens de soluções otimizadas para a cobertura, com diferentes configurações no que diz respeito à amplitude e à densidade das aberturas na cobertura. A secção c) mostra um gráfico de resultados para o fator de iluminação (DF) e para a irradiação incidente (i) ao longo do número de gerações do algoritmo genético, de acordo com o desempenho obtido pelas soluções para a configuração da cobertura. É possível observar que à medida que o número de gerações aumenta, o valor do fator de iluminação aumenta para um valor menor de irradiação incidente. (Turrin 2014, 343)

Focando-se na temática das grandes coberturas, a investigação visa desenvolver uma abordagem de projeto computacional para apoiar os projetistas na exploração de formas geométricas com um bom desempenho.

*“ The approach is meant to facilitate the multidisciplinary integration and the learning process of the designer; and not to constrain the process in precompiled procedures or in hard engineering formulations, nor to automatize it by delegating the design creativity to computational procedures. ” (Turrin 2014, 9)*

A figura 2.4 ilustra algumas soluções de projeto elaboradas por Turrin para o projeto de concepção de uma cobertura, aplicando as metodologias e os instrumentos definidos na sua tese.

No que diz respeito a investigações que abordam a otimização energética no projeto de edifícios, importa também referenciar a investigação desenvolvida por Thomas Wortmann. A sua tese de doutoramento “Efficient, Visual, and Interactive Architectural Design Optimization with Model-based Methods” apresenta um estudo interdisciplinar relativo à otimização do projeto arquitetónico, que se baseia na teoria do projeto, na otimização dos edifícios, na otimização matemática, e na visualização multivariada (Wortmann 2018, 4).

O trabalho de Wortmann examina os desafios para a integração da otimização nos processos de projeto arquitetónico. O projeto arquitetónico é cada vez mais influenciado por métodos computacionais sistemáticos, como o projeto paramétrico (Woodbury 2010), a simulação de desempenho (Malkawi 2005), o projeto baseado em desempenho (Kolarevic 2005; Oxman 2006; Hensel 2013) e o “Building Information Modelling” (BIM) (Kensek 2014). Tais métodos permitem que os projetistas desenvolvam projetos geometricamente complexos, enquanto prevêm com mais precisão o seu desempenho futuro (Luebkehan e Shea 2005; Lin e Gerber 2014; Wortmann e Tuncer 2017). Quando os projetistas definem parametricamente os espaços de projeto e simulam numericamente o desempenho de soluções individuais, os métodos de otimização matemática

podem identificar soluções de bom desempenho (Wortmann 2018, 46). É essa a mais valia da integração da otimização nos processos de projeto arquitetônico.

A investigação de Wortmann também examina métodos de visualização multivariada, testando-os para uma exploração do espaço de projeto, de um modo interativo e informado sobre o desempenho. Desse modo, abre caminho para o desenvolvimento de ferramentas de otimização que fornecem não apenas boas soluções de projeto, mas permitem também a compreensão, a reflexão e a exploração interativa do espaço de projeto (Wortmann 2018, 80).

Wortmann desenvolve e propõe uma nova ferramenta de otimização, designada por Opossum, a qual constitui um solucionador de otimização com modelos substitutos. Modelos substitutos são modelos matemáticos, estatísticos ou de “machine-learning”, de processos que demoram muito e/ou são difíceis de avaliar, como são as experiências físicas e as simulações. Os modelos substitutos interpretam resultados conhecidos para substituir processos lentos e exatos, como as simulações, por processos mais rápidos e potencialmente menos precisos (Wortmann 2018, 107). A ferramenta de otimização Opossum fornece um interface de acesso a uma biblioteca RBFOpt de código aberto, a qual oferece vários algoritmos de otimização com modelos substitutos, os quais permitem efetuar a otimização de projetos de edifícios. Os algoritmos de otimização RBFOpt constituem uma alternativa válida a outros tipos de algoritmos de otimização, tal como os algoritmos genéticos. A ferramenta Opossum permite também que os projetistas inspecionem os valores de desempenho e as morfologias de todas as soluções de projeto avaliadas. Para isso, o Opossum integra uma ferramenta de exploração das soluções de projeto, o Performance Explorer, o qual fornece um Mapa de Desempenho das soluções de projeto, avaliadas previamente através da biblioteca de algoritmos de otimização com modelos substitutos RBFOpt.

A figura 2.5 mostra uma imagem da ferramenta Performance Explorer do Opossum, a qual é aplicada nos softwares Rhinoceros 3D e Grasshopper. A figura 2.6 ilustra também uma solução de projeto, obtida através dos algoritmos de otimização RBFOpt do Opossum, para a configuração dos vãos de uma

parede de um edifício de escritórios em um clima tropical, de modo a minimizar o consumo energético do edifício.

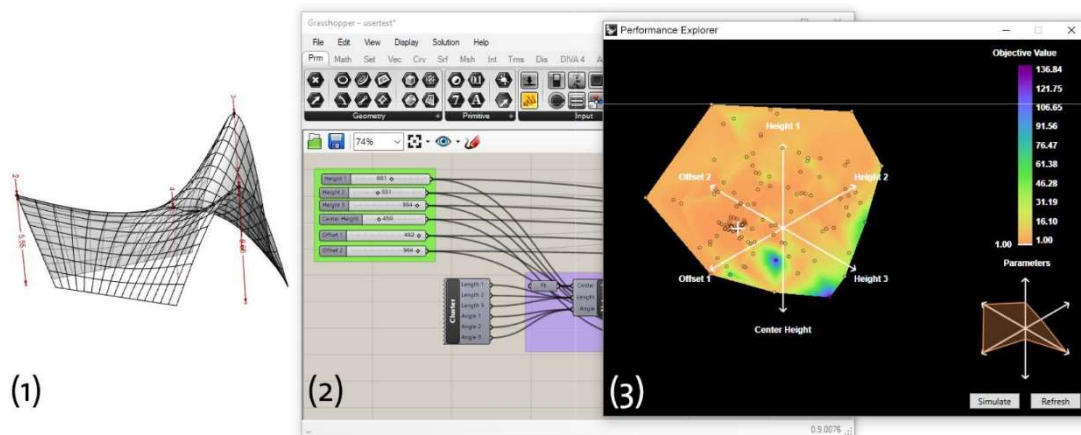


Figura 2.5: Imagem da ferramenta Performance Explorer no software Rhinoceros 3D. Da esquerda para a direita: (1) Morfologia do atual candidato no Rhinoceros 3D, (2) definição do modelo paramétrico no Grasshopper (observar a caixa verde com os controles numéricos deslizantes, que representam as variáveis do projeto e os seus valores atuais), e (3) a janela do Performance Explorer, onde é possível visualizar o desempenho das soluções individuais de projeto. (Wortmann 2018, 198)



Figura 2.6: Solução de projeto obtida pela ferramenta Opossum para uma parede, a qual proporciona 84% de Iluminação de Luz do Dia Útil, em um contexto com 24% de Probabilidade de Claridade Diurna. Para espaços de escritórios em climas tropicais, este género de paredes, com este tipo de aberturas, podem proporcionar uma economia de energia substancial (no arrefecimento e na iluminação artificial), ao mesmo tempo que evitam a necessidade de venezianas e de outros elementos móveis. (Wortmann 2018, 169)

Outra investigação de relevo que intersesta as áreas da energia, do desempenho e dos processos de projeto é a desenvolvida por Gonçalo Castro Henriques na

sua tese “TETRASCRIPT: Sistema de Aberturas Responsivo para controlar a luz, de acordo com fatores externos e internos”. Aqui, o desempenho energético encontra-se focado na temática da iluminação natural. Importa referir que esta investigação parte do pressuposto de que antes da revolução industrial, os produtos eram feitos à medida, de um modo personalizado. A produção em série permitiu produtos mais baratos, mas menos personalizados. A aplicação das tecnologias digitais em arquitetura pode permitir não só edifícios mais personalizados, mas também mais adaptados ao meio (Henriques 2013, 3). O trabalho de Gonçalo Castro Henriques propõe um sistema aplicável a diferentes situações, definindo os métodos e as ferramentas computacionais necessárias para o gerar e controlar. Tal proposta é concretizada através do desenvolvimento de um “sistema específico de aberturas responsivo, designado por TetraScript, que se adapta a diferentes condições ambientais externas e exigências funcionais internas. Este sistema é aplicável a diferentes geometrias, usos, localizações, horas e condições de céu” (Henriques 2013, 3). O sistema TetraScript de Henriques utiliza dois processos de adaptação, a estática e a dinâmica. A adaptação estática é utilizada durante o projeto para determinar o número, disposição e dimensão das clarabóias.

A figura 2.7 mostra um diagrama gráfico ilustrativo do sistema TetraScript, indicando os dados de entrada externos e internos que definem a configuração, a dimensão e a localização das aberturas em uma superfície.

Utilizando a computação é possível gerar, mas também fabricar e automatizar um pavilhão, por exemplo, com o sistema de aberturas responsivo. A adaptação dinâmica é aplicada após a construção para encontrar configurações de aberturas que satisfaçam requisitos de luz, nomeadamente iluminância e contraste visual. Como há uma infinidade de soluções, são utilizadas heurísticas com um sistema paramétrico para encontrar configurações, tendo em conta o seu desempenho. O sistema fornece uma vasta gama de soluções com boa iluminância e baixo contraste visual para variadas utilizações. É proposto também um método de previsão para assegurar os requisitos noutras situações, propondo um controlo colaborativo entre o usuário e o sistema, assegurando os requisitos em tempo-real. É possível desse modo obter soluções personalizadas,

consoante o contexto específico de cada situação real, no que diz respeito ao meio ambiente e aos desejos do utilizador.

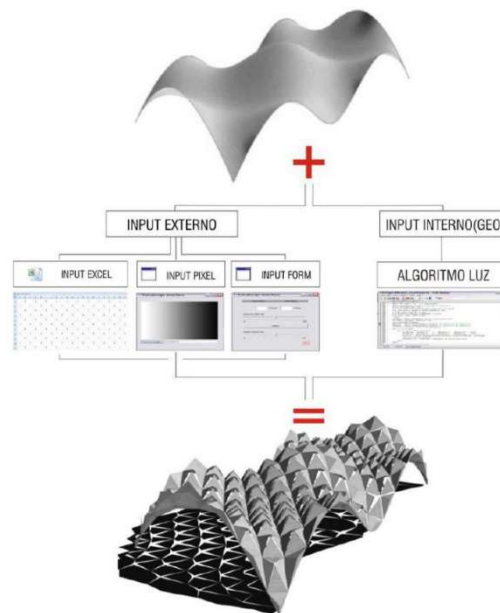


Figura 2.7: Diagrama gráfico ilustrativo do sistema TetraScript. Para uma determinada superfície, são determinados inputs (dados de entrada) externos tais como a configuração, a dimensão e a localização das aberturas, e dados internos tais como as condições de iluminação no espaço interior definido pela superfície. Da conjugação dos dados externos e internos, definem-se as configurações possíveis para uma superfície de aberturas responsiva elaborada pelo sistema TetraScript. (Henriques 2013, 193)

## 2.3 A energia e as gramáticas da forma

Uma outra área de investigação de interesse que tem vindo a ser desenvolvida recentemente é aquela que procura relacionar a energia com as gramáticas da forma. Trata-se de uma área que a presente tese, “Projeto baseado em Energia: Projeto Digital de Envelopes de Edifícios”, pretende desenvolver e dar continuidade.

Uma gramática da forma define um conjunto de formas, denominado de linguagem projetual (Stiny 1980, 347). As formas da linguagem são geradas a partir de uma forma inicial, a qual também pertence à linguagem, e por um conjunto de regras de transformação de forma que se aplicam à forma inicial e

às restantes formas da linguagem. Desse modo, a partir de uma única forma inicial e de um conjunto de regras de transformação de forma, é possível gerar formas variadas, todas elas diferentes, mas pertencentes à mesma linguagem. As gramáticas da forma têm sido utilizadas e desenvolvidas nos mais variados domínios, como a arquitetura, o urbanismo, o design e a engenharia. Na arquitetura, por exemplo, José Pinto Duarte propõe um processo para a personalização em série de habitação baseada em projeto assistido por computador e sistemas de produção. Tal processo é ilustrado com um caso de estudo que inclui uma gramática da forma desenvolvida para as habitações projetadas pelo arquiteto Álvaro Siza na Malagueira (Duarte 2001, 5), em Évora, Portugal. A gramática da forma desenvolvida permite o projeto de habitações personalizadas, consoante os requisitos dos clientes e de acordo com a linguagem definida por Álvaro Siza para a localidade da Malagueira.

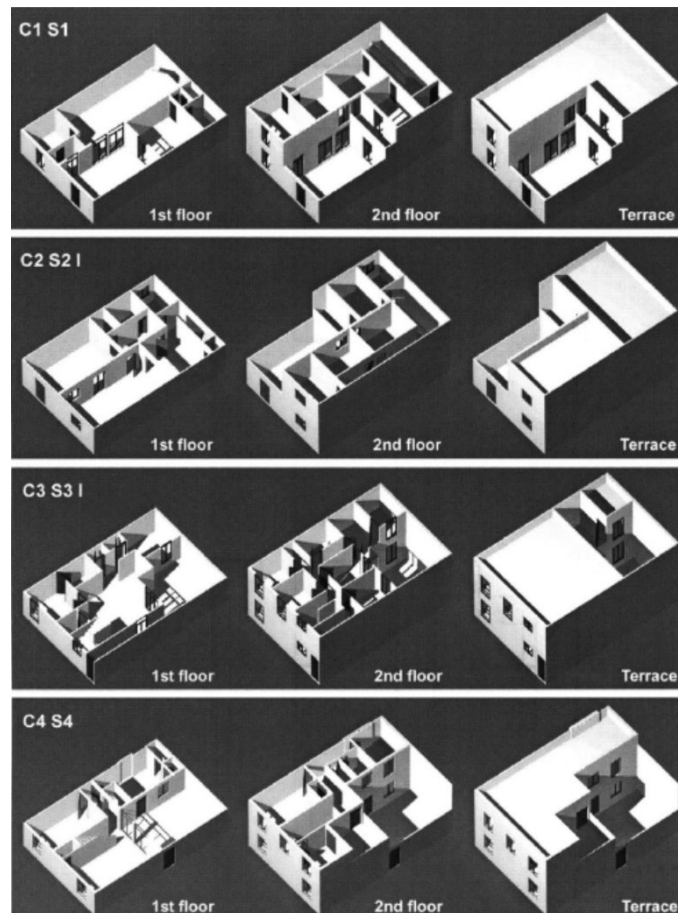


Figura 2.8: Imagens de modelos digitais 3D de quatro soluções de projeto para habitações personalizadas, elaboradas através da utilização de uma gramática desenvolvida por Duarte para as casas da Malagueira de Álvaro Siza. (Duarte 2001, 320)

A figura 2.8 mostra alguns exemplos de soluções de projeto de habitações personalizadas, projetadas através da utilização da gramática desenvolvida por Duarte.

No âmbito das investigações que relacionam as gramáticas da forma com o projeto de habitações, é de referir também o trabalho de Luís Romão, o qual desenvolve uma descrição morfológica da habitação ilegal, construída pelos seus proprietários, na Área Metropolitana de Lisboa entre os anos de 1974 e 1984 (Romão 2005, 3). O estudo desenvolvido teve três objetivos: perceber melhor as habitações ilegais, elaborar uma representação formal das mesmas apesar da aparência caótica e origem dessas habitações ilegais, e contribuir para a formalização de uma implementação em computador que possa prevenir ecos adicionais deste cenário.

Um outro exemplo de aplicação de gramáticas da forma, mas no urbanismo, consiste na investigação desenvolvida por José Nuno Beirão, o qual propõe um método de projeto para o desenho de espaços urbanos utilizando instrumentos de projeto baseados em gramáticas da forma (Beirão 2012, 9). O seu trabalho foca-se no desenvolvimento de instrumentos computacionais para a geração de projetos urbanos.

No que diz respeito a trabalhos que relacionem a energia com as gramáticas da forma, importa destacar a proposta de Vasco Granadeiro, o qual propõe um novo processo de projeto para as fases iniciais de conceção de edifícios: o uso de sistemas generativos de projeto de arquitetura com simulação energética integrada (Granadeiro 2013, i). A sua tese “Early design and optimization of the building envelope: Integrating architectural generative design systems and energy performance calculations”, em português “Projeto preliminar e otimização do envelope do edifício: Integrando sistemas de projeto generativo arquitetónico e cálculos de desempenho energético”, realiza uma integração entre as gramáticas da forma (sistema generativo de projeto) e o desempenho energético (neste caso, o consumo energético em edifícios residenciais). O objetivo consiste em estabelecer métodos de apoio a decisões de projeto em fases iniciais, relativas ao projeto do envelope do edifício, para edifícios residenciais

(Granadeiro 2013, i). A investigação apresenta duas linhas condutoras: composição arquitetónica e desempenho energético.

*“ First, a design methodology was devised, proposing a new design process for early stages: the use of architectural generative design systems with integrated energy simulation. After, a representation was created to enable the optimization of the proposed system by genetic algorithms. Lastly, since the use of complex generative design systems is hardly compatible with conventional design processes, a design indicator of energy performance for residential buildings was created. “ (Granadeiro 2013, iii)*

Foram usados como caso de estudo na investigação uma gramática da forma das casas da pradaria de Frank Lloyd Wright e um software de simulação energética, integrando-se estes dois elementos em um programa de computador que representa o sistema de projeto de Frank Lloyd Wright com uma simulação energética integrada. Torna-se assim possível o projeto de habitações com um eficiente desempenho energético, ou seja, o projeto de habitações que têm valores mínimos de consumo energético. Na figura 2.9 é possível visualizar alguns exemplos de formas geradas para o envelope das casas da pradaria de Frank Lloyd Wright, as quais foram selecionadas através da utilização de um algoritmo genético, tendo em conta os valores de consumo energético que apresentam. Vale a pena também explicitar que a abordagem de Granadeiro utiliza uma gramática da forma com a finalidade de gerar diferentes soluções funcionais e compositivas para as casas da pradaria de Frank Lloyd Wright, encontrando depois no universo de soluções geradas pela gramática, e através da utilização de algoritmos genéticos, aquelas soluções que apresentam menores valores de consumo energético.

A presente tese, “Projeto baseado em Energia: Projeto Digital de Envelopes de Edifícios”, prossegue com a área de investigação do trabalho de Granadeiro, relacionando as gramáticas da forma com a energia e com o desempenho energético dos edifícios. Diferencia-se no entanto relativamente à investigação de Granadeiro em dois aspetos: o primeiro aspeto consiste em que se foca na

geração de energia elétrica no envelope dos edifícios, através da captação de energia solar no envelope e da sua transformação em energia elétrica através da utilização de tecnologia fotovoltaica. Ou seja, é desenvolvido o tema da geração e produção de energia elétrica, complementando o tema do consumo energético desenvolvido por Granadeiro.

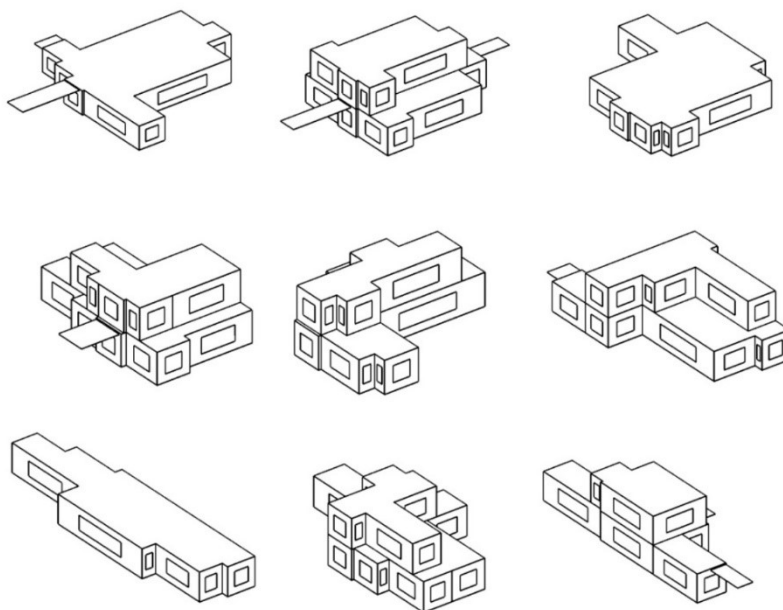


Figura 2.9: Modelos 3D de nove soluções geradas pela gramática da forma para o envelope das casas da pradaria de Frank Lloyd Wright, ordenadas da esquerda para a direita e de cima para baixo, de acordo com uma crescente necessidade de consumo energético por  $m^2$ . A solução em cima e à esquerda é a que apresenta um menor valor de consumo energético e a solução em baixo à direita é a que apresenta um maior valor de consumo energético. (Granadeiro 2013, 42)

O segundo aspeto refere-se ao facto de que na presente tese se utilizam as gramáticas da forma para modelar diretamente a forma do envelope dos edifícios, de modo a melhorar o desempenho destes no que diz respeito à captação de energia solar e à produção de energia elétrica no envelope. Diferencia-se da abordagem de Granadeiro na medida em que este, como referido anteriormente, propõe um método que utiliza uma gramática da forma para gerar diferentes soluções funcionais e compositivas para o envelope das casas da pradaria de Frank Lloyd Wright, não tendo contudo a gramática da forma na sua definição qualquer meio de melhorar ou influenciar diretamente o consumo energético dos edifícios. O método elaborado procura encontrar, isso

sim, no universo de soluções geradas pela gramática da forma para o envelope, aquelas soluções que apresentam menores valores de consumo energético. A presente tese, ao utilizar as gramáticas da forma para gerar diretamente formas para o envelope dos edifícios em função da energia solar que captam e da sua respetiva produção de energia elétrica, pretende estabelecer uma maior relação e integração entre as áreas das gramáticas da forma e da energia. Interessa também salientar que a geração das formas para o envelope dos edifícios que é feita deste modo respeita as necessidades de organização funcional no interior dos edifícios. Tais necessidades de organização funcional constituem constrangimentos durante o processo de geração de formas para o envelope dos edifícios.

Importa ainda referir que a investigação descrita na presente tese se baseia na investigação relatada pelo autor da tese nos artigos “Towards a grammar-based system for the design of building envelopes that maximize the capture of solar energy” (Mateus, Duarte e Leal, 2015) e “A grammar-based system for building envelope design to maximize PV performance” (Mateus e Duarte, 2016), onde é proposta uma metodologia para projetar a forma do envelope dos edifícios que maximize a quantidade de energia elétrica que estes geram. A metodologia em causa inclui um sistema de projeto baseado em gramáticas da forma, composto por uma forma inicial que representa o envelope do edifício e por um conjunto de regras de transformação que se aplicam recursivamente de modo a gerar formas adequadas para o envelope do edifício, ou seja, formas que maximizem a quantidade de energia elétrica que o envelope do edifício pode gerar. A investigação relatada nestes dois artigos, os quais se apresentam na secção Anexos da presente tese, serviu pois de ponto de partida para a investigação descrita na presente tese.

## **2.4 Síntese do Capítulo**

O capítulo Estado da Arte efetua uma revisão da investigação mais relevante que serve de referência para a investigação desenvolvida na presente tese: “Projeto baseado em Energia: Projeto Digital de Envelopes de Edifícios”.

No sub-capítulo “Processos de análise da forma e processos de projeto” são relatadas as investigações que não consideram em simultâneo a área dos processos de projeto e a área da energia, mas que abordam um destes dois aspetos, sendo de interesse pelo modo como o fazem. É referida investigação sobre processos de análise da forma, a qual relaciona os processos de geração de forma com os processos que envolvem a utilização ou a transformação de energia. Os processos de análise da forma investigados são baseados em processos de formação oriundos da natureza e dos seres vivos, recolhendo-se informações sobre a área das Ciências Naturais e da Biologia, mas também baseados em processos de formação oriundos das Ciências do Artificial. É referida também investigação em processos de projeto, nomeadamente a Computação de Projeto baseada em Materiais, que não está diretamente relacionada com a temática da energia, mas que pela metodologia que adota é de interesse e constitui uma referência para a investigação desenvolvida na presente tese.

O sub-capítulo “A energia no processo de projeto” realiza uma síntese histórica do modo como a energia foi abordada no processo de projeto em arquitetura ao longo da história, indicando também as investigações recentes mais relevantes sobre essa temática. No sub-capítulo “A energia e as gramáticas da forma” é referida a investigação que serve de referência na relação entre as áreas da energia e das gramáticas da forma.

Com as descrições e referências indicadas, pretende-se constituir um corpo teórico de base que suporte e inspire a investigação desenvolvida na presente tese, a qual se relata nos próximos capítulos.

## 2.5 Referências do Capítulo 2

**Beirão, José.** 2012. “City Maker: Designing Grammars for Urban Design”. PhD dissertation. Delft University of Technology, Faculty of Architecture, Delft, Netherlands.

**Caldas, Luisa.** 2001. “An Evolution-Based Generative Design System: Using Adaptation to Shape Architectural Form”. PhD dissertation. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts, United States of America.

**Duarte, José.** 2001. “Customizing Mass Housing: A Discursive Grammar for Siza’s Malagueira Houses”. PhD dissertation. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts, United States of America.

**Granadeiro, Vasco.** 2013. “Early design and optimization of the building envelope: Integrating architectural generative design systems and energy performance calculation”. PhD dissertation. Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, Portugal.

**Henriques, Gonçalo Castro.** 2013. “TETRASCRIPT: Sistema de aberturas responsivo para controlar a luz, de acordo com fatores externos e internos”. Tese de Doutoramento. Faculdade de Arquitetura da Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, Portugal.

**Hensel, M.** 2013. *Performance-Oriented Architecture: Rethinking Architectural Design and the Built Environment*. Chichester, United Kingdom: Wiley.

**Kalay, Yehuda.** 1999. “Performance-based design”. *Automation in Construction* 8: 395-409.

**Kensek, Karen, and Douglas Noble.** 2014. *Building information modeling: BIM in current and future practice*. United States: Wiley.

**Kolarevic, B.** . 2005. “Computing the Performative.” In *Performative architecture beyond instrumentality*, edited by Kolarevic B., Malkawi A., 193-202. Hoboken, New Jersey: Taylor and Francis.

**Lin, S. Eve and David J. Gerber.** 2014. “Designing-in Performance: A framework for evolutionary energy performance feedback in early stage design.” *Automation in Construction* 38, 59-73.

**Luebke, C. and Kristina Shea.** 2005. “CDO: Computational design + optimization in building practice”. *The ARUP Journal* May: 17-21.

**Malkawi, A.** . 2005. “Performance Simulation.” In *Performative architecture beyond instrumentality*, edited by Kolarevic B., Malkawi A., 85-95. Hoboken, New Jersey: Taylor and Francis.

**Mateus, Daniel, Maurício Sousa, Rui de Klerk, Sandra Gama, Joaquim Jorge, and José Pinto Duarte.** 2015. “From Tecton to Technos: going back to the classical roots of Architecture using virtual reality”. In *Real Time Extending the Reach of Computation – Proceedings of the 33th*

*eCAADe Conference, 16-18 September, 2015*, edited by Bob Martens et al., 107-116. TU Wien, Austria.

**Mateus, Daniel, José Pinto Duarte and Vítor Leal.** 2015. "Towards a grammar-based system for the design of building envelopes that maximize the capture of solar energy". In *10th Conference on Advanced Building Skins, 3-4 November, 2015*, edited by Economic Forum, 52-61. Bern, Switzerland.

**Mateus, Daniel, and José Pinto Duarte.** 2016. "A grammar-based system for building envelope design to maximize PV performance". In *11th Conference on Advanced Building Skins, 10-11 October, 2016*, edited by Advanced Building Skins GmbH, 19-27. Bern, Switzerland.

**Oxman, R.** 2006. "Theory and design in the first digital age." *Design Studies* 27:3, 229-265.

**Oxman, Neri.** 2010. "Material-based Design Computation". PhD dissertation. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts, United States of America.

**Pearce, Peter.** 1990. *Structure in Nature is a Strategy for Design*. Cambridge, Massachusetts: The M.I.T. Press.

**Romão, Luís .** 2005. "A Study of Illegal Housing of Lisbon Built in 1974 to 1984: From Description to Computation". PhD dissertation. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts, United States of America.

**Simon, Herbert A. .** 1969. *The Sciences of the Artificial*. Cambridge, Massachusetts: The M.I.T. Press.

**Stiny, George.** 1980. "Introduction to shape and shape grammars". *Environment and Planning B* 7: 343-351.

**Szokolay, Steven V. .** 2008. *Introduction to Architectural Science: The Basis of Sustainable Design*. Oxford: Architectural Press.

**Terzidis, Kostas.** 2006. *Algorithmic Architecture*. Great Britain: Architectural Press.

**Turrin, Michela.** 2014. "Performance Assessment Strategies: A computational framework for conceptual design of large roofs". PhD dissertation. Delft University of Technology, Faculty of Architecture and The Built Environment, Delft, Netherlands.

**Thompson, D'Arcy Wentworth.** [1942] 1992. *On Growth and Form. The Complete Revised Edition*. New York: Dover Publications.

**Woodbury, Robert.** 2010. *Elements of Parametric Design*. London, UK; New York, USA: Routledge.

**Wortmann, Thomas and Bige Tunçer.** 2017. "Differentiating parametric design: Digital workflows in contemporary architecture and construction." *Design Studies* 52, 173-197.

**Wortmann, Thomas.** 2018. "Efficient, Visual, and Interactive Architectural Design Optimization with Model-based Methods". PhD dissertation. Singapore University of Technology and Design, Singapore.



# **CAPÍTULO 3**

## **Projeto baseado em Energia: Visão e Linha de Investigação proposta**



## **CAPÍTULO 3**

# **Projeto baseado em Energia: Visão e Linha de Investigação proposta**

Neste capítulo é descrita a visão e a linha de investigação proposta na presente tese. É justificada a pertinência do Projeto baseado em Energia, tendo em conta a importância que a energia desempenhou no funcionamento e no bem-estar da sociedade ao longo da história, assumindo também cada vez maior destaque na sociedade contemporânea. Essa importância e destaque é notória em diferentes áreas de atividade humana e áreas tecnológicas, tais como nos edifícios, na construção, na saúde, na computação, na robótica, entre outras. No âmbito da presente tese, é contudo focada a utilização da energia em edifícios, identificando os principais aspetos e utensílios onde a mesma é consumida, bem como as vantagens de gerar e produzir a energia que os edifícios consomem no próprio envelope dos edifícios. São também descritos os benefícios de integrar o desempenho energético no processo de conceção dos edifícios, benefícios esses que abrangem aspetos de natureza ambiental, económica e estética, tendo implicações diretas na imagem arquitetónica dos edifícios. Finalmente, é proposta a elaboração de um modelo tipo BEM (Building Energy Modeling) que possa servir de referência para a elaboração de software que suporte a conceção de edifícios com um desempenho energético eficiente, apresentando-se uma descrição de um modelo deste tipo.

### **3.1 A importância histórica da energia na sociedade**

A energia tem desempenhado um papel fundamental para o ser humano ao longo da história. Constitui um elemento essencial para a sua evolução, desde os primórdios da sua existência como nómada (utilizando o fogo para se aquecer e para cozinhar alimentos) até à sua vida atual em sociedade (utilizando energias como as renováveis para os mais diversos aspetos, como a produção de bens, os transportes, a comunicação, a construção e manutenção de edifícios, a reciclagem de produtos, entre outros). A evolução histórica da utilização da energia e a importância crescente que esta assumiu para o ser humano e para

a vida em sociedade que este construiu, pode ser melhor compreendida se for identificada e associada com as revoluções industriais (Figura 3.1).

Porém, importa referir que antes das revoluções industriais, uma outra revolução aconteceu: a revolução agrária. A primeira mudança no modo de vida do ser humano – a transição do nomadismo para a agricultura – aconteceu há cerca de 10 000 anos e tornou possível a domesticação de animais. A revolução agrícola combinou a força dos animais com a dos humanos para favorecer a produção, o transporte e a comunicação. A pouco e pouco, a produção de alimentos melhorou, estimulando o crescimento da população e permitindo o surgimento de povoações humanas cada vez maiores. Isto acabou por levar à urbanização e ao surgimento das cidades. À revolução agrícola seguiram-se uma série de revoluções industriais que começaram na segunda metade do século XVIII. Estas revoluções marcaram a transição da força muscular para a energia mecânica, que evoluiu até hoje, com a quarta revolução industrial, em que o aperfeiçoamento da capacidade cognitiva está a aumentar a produção humana (Schwab 2017, 9).



Figura 3.1: As quatro revoluções industriais: características. (adaptada de Prof. Ana Paula 2019)

A primeira revolução industrial ocorreu entre 1760 e 1840, aproximadamente. Desencadeada pela invenção da máquina a vapor e pela construção de caminhos-de-ferro, deu início à produção mecânica. A segunda revolução industrial, que começou no final do século XIX, prolongando-se pelo início do século XX, tornou possível a produção em série, e foi impulsionada pelo advento

da eletricidade e da linha de montagem. A terceira revolução industrial começou na década de 1960. É habitualmente chamada “revolução dos computadores” ou “revolução digital” porque foi catalisada pelo desenvolvimento dos semicondutores, da computação *mainframe* (década de 1960), dos computadores pessoais (década de 1970 e 80) e da Internet (década de 1990) (Schwab 2017, 10).

Na atualidade, estamos no início de uma quarta revolução industrial. Esta revolução começou na viragem deste século e baseia-se na revolução digital. Caracteriza-se por uma Internet muito mais móvel e omnipresente, por sensores mais pequenos e mais potentes, que se tornaram mais baratos, pela Inteligência Artificial e pela aprendizagem automática. As tecnologias digitais centradas em hardware, software e redes de computadores não são novas, mas estão a criar ruturas com a terceira revolução industrial; tornaram-se mais sofisticadas e integradas e, como resultado, estão a transformar as sociedades e a economia global. Por essa razão, os professores do Massachusetts Institute of Technology (MIT) Erik Brynjolfsson e Andrew McAfee defenderam que este período é “a segunda era da máquina” (Brynjolfsson e McAfee 2014), o título do seu livro de 2014, defendendo que o mundo está num ponto de inflexão em que o efeito destas tecnologias digitais se manifestará com a “máxima força” por meio da automatização e de “coisas sem precedentes”. Na Alemanha, há discussões sobre a “Indústria 4.0”, uma expressão cunhada em 2011, na Feira de Hannover, para descrever a forma como isso irá revolucionar a organização das cadeias de valor globais. Ao viabilizar “fábricas inteligentes”, a quarta revolução industrial cria um mundo onde os sistemas de fabrico físicos e virtuais cooperam uns com os outros de uma forma global e flexível. Isto permite a total personalização de produtos e a criação de novos modelos operacionais.

A quarta revolução industrial, contudo, não se refere apenas a máquinas e a sistemas inteligentes e conectados. O seu alcance é muito mais vasto. Ondas de novas descobertas ocorrem simultaneamente em áreas que vão desde o sequenciamento genético à nanotecnologia, passando pelas energias renováveis ou pela computação quântica. É a fusão destas tecnologias e a

interação entre os domínios físico, digital e biológico que torna a quarta revolução industrial radicalmente diferente das revoluções anteriores (Schwab 2017, 11).

Em todas estas revoluções, a agrária e as quatro industriais, a energia é o elemento preponderante e que faz a diferença, levando a mudanças na organização da sociedade e a um aumento da qualidade de vida das pessoas. Com a revolução agrária, o ser humano conjugou a energia da sua força de trabalho com a energia da força de trabalho dos animais, por meio da sua domesticação. Soube também utilizar a energia dos elementos naturais, como o sol, para criar a agricultura e produzir alimentos de um modo organizado e controlado. A primeira revolução industrial estabeleceu uma mudança na principal fonte de energia, a qual deixou de ser a energia da força de trabalho humana e animal, para passar a ser a energia proveniente da máquina a vapor, a qual deu início à energia e à produção mecânica. A segunda revolução industrial trouxe a energia elétrica, permitindo o início da produção em série. A terceira revolução industrial caracteriza-se por ter melhorado o domínio sobre a utilização da energia elétrica, ampliando o leque de utilizações da mesma, o qual foi possibilitado através do desenvolvimento de novas áreas tecnológicas como a eletrónica e a eletrotécnica, as quais permitiram o surgimento e o fabrico de novas tecnologias como os semicondutores, os computadores e a internet. A quarta revolução industrial tem-se destacado por um maior desenvolvimento destas tecnologias, com especial destaque para a tecnologia dos sensores, dos semicondutores e da internet (a qual é cada vez mais móvel e omnipresente), as quais estão a contribuir para a formação da internet das coisas e para a constituição de sistemas ciberfísicos (sistemas que conectam elementos físicos com elementos digitais). Para o desenvolvimento da internet das coisas e dos sistemas ciberfísicos, importa referir a importância que as ondas eletromagnéticas assumem, para que a transmissão de informação entre dispositivos possa ser feita através do ar. Todas estas tecnologias têm levado a um aumento global de utilização de energia, com especial destaque para a energia elétrica, em todo o mundo. No futuro, a tendência é para que a utilização de energia esteja cada vez mais presente na vida e no dia-a-dia das pessoas, assumindo uma importância crescente na sociedade e no desenvolvimento de novas tecnologias.

É pois essencial ter uma noção sobre a importância histórica da energia na sociedade e na vida das pessoas, noção essa que o presente subcapítulo pretende dar, ao descrever de um modo genérico o modo como a energia foi utilizada ao longo da história para o desenvolvimento de novas tecnologias e para o aumento da qualidade de vida. Essa evolução no modo de utilização da energia pode ser entendida através da interpretação das Revoluções Industriais. Pois aquilo que permite o surgimento dos novos modelos de fabrico e dos novos desenvolvimentos tecnológicos, introduzidos pelas revoluções industriais, é precisamente um novo tipo de energia ou um novo modo de utilização da energia.

O presente subcapítulo descreve assim uma interpretação sumária da relação entre as revoluções industriais e a energia. Pretende constituir uma noção genérica sobre esta temática, abordando as revoluções industriais e a sua relação com a energia de um modo sintético. Uma análise mais detalhada desta temática exige estudos e análises mais aprofundados, os quais não foram desenvolvidos no âmbito da presente tese por não constituírem o seu foco principal. Importa apenas reter a importância da energia para a sociedade e, deste modo, a vantagem de considerar a energia como um dos fatores essenciais no desenvolvimento do projeto de edifícios.

Deste modo, do presente subcapítulo é possível deduzir que uma vez que a energia tem sido um fator determinante para a evolução tecnológica, faz sentido que se estabeleça um método de projeto e de conceção baseado em energia. É esse o objetivo principal da presente tese, criar um método de projeto e de conceção baseado em energia, tomando como caso de estudo o projeto de envelopes de edifícios. Tal método permitirá projetar e conceber envelopes de edifícios com melhor desempenho energético no que se refere à captação de irradiação solar incidente, para transformação em energia elétrica, o que irá contribuir também para diminuir a pegada ecológica da atividade humana, na medida em que contribui para a diminuição da necessidade de utilização de combustíveis fósseis, para a produção de energia elétrica. Tal diminuição da necessidade de utilização de combustíveis fósseis, ao diminuir a emissão de

gases poluentes para a atmosfera, também provoca um aumento na qualidade de vida das pessoas.

### **3.2 Áreas de atividade humana e áreas tecnológicas onde a energia é preponderante**

O presente subcapítulo pretende expôr a importância que a energia tem em diversas áreas de atividade humana (entre as quais a área dos edifícios) e áreas tecnológicas, e justificar assim o objetivo geral da tese de desenvolver uma abordagem ao projeto centrada na energia e na melhoria do desempenho energético.

São variadas as áreas de atividade humana e as áreas tecnológicas onde a energia desempenha um papel fundamental. Destacam-se neste subcapítulo algumas dessas áreas, que se entendem ser algumas daquelas onde a energia, devido aos novos desenvolvimentos tecnológicos, possa vir a ter um impacto mais significativo e mais benéfico, na diminuição da pegada ecológica, no aumento da qualidade de vida das pessoas e no funcionamento da sociedade. As áreas em questão foram definidas pelo autor da tese, tendo como referência as mudanças na sociedade apontadas por Schwab (Schwab 2017, 111-158) no seu livro “A Quarta Revolução Industrial”, mudanças essas que se baseiam no relatório “Uma Mudança Profunda – Pontos de Viragem Tecnológicos e Impactos Sociais”, elaborado pelo Fórum Económico Mundial e publicado em Setembro de 2015. O relatório em causa indica as tecnologias que se prevê que tenham um impacto mais significativo no futuro próximo, provocando alterações profundas nos indivíduos, nas organizações, nos governos e na sociedade.

O Projeto baseado em Energia, proposto pela presente tese, pretende estabelecer um paradigma de projeto que pode ser aplicado no projeto de produtos e serviços relacionados com as diferentes áreas de atividade humana e áreas tecnológicas que são definidas no presente subcapítulo, visando um melhor desempenho energético de tais produtos e serviços. Assim, para além do exemplo da área dos edifícios (e do envelope dos edifícios, tema específico que é desenvolvido na presente tese), onde é importante abordar o projeto dos

mesmos de acordo com as questões da energia e do desempenho energético, de modo a diminuir a pegada ecológica dos edifícios e a aumentar a qualidade de vida do ser humano, a presente tese indica também outras áreas de atividade e áreas tecnológicas onde a energia constitui um fator essencial, e onde o Projeto baseado em Energia pode ser igualmente aplicado para o projeto de produtos e serviços, de modo a que essas áreas também contribuam para a diminuição da pegada ecológica e para o aumento da qualidade de vida do ser humano.

As áreas de atividade humana definidas na presente investigação como sendo algumas daquelas em que se prevê que a energia venha a ter um impacto mais acentuado são a Saúde, os Transportes, a Construção (de edifícios, espaços públicos e infra-estruturas) e os Edifícios. As áreas tecnológicas são a Internet das Coisas, a Computação Ubíqua e Inteligência Artificial, a Robótica e a Impressão 3D. No que diz respeito às áreas tecnológicas, o Projeto baseado em Energia poderá eventualmente vir a ser aplicado para o projeto de produtos e serviços relacionados com estas tecnologias, de modo a melhorar o desempenho energético de tais produtos e serviços. Mas o Projeto baseado em Energia poderá também utilizar estas áreas tecnológicas como suporte para o projeto de edifícios, uma vez que se tratam de áreas tecnológicas que detêm potencial para melhorar o desempenho energético dos edifícios. A presente tese não aborda estas áreas tecnológicas para melhorar o desempenho energético dos edifícios, mas indica-as com o objetivo de as explorar nesse sentido, associadas aos métodos propostos pela presente tese, numa fase posterior de investigação. Descrevem-se pois de seguida, de um modo sintético, as áreas de atividade humana e as áreas tecnológicas identificadas como algumas daquelas em que se prevê que no futuro próximo a temática da energia venha a ter um impacto significativo, podendo o Projeto baseado em Energia ser aí aplicado, de modo a permitir a elaboração de produtos e serviços com um melhor desempenho energético:

### **1) Saúde:**

A saúde é uma área fundamental, pois lida diretamente com a qualidade de vida das pessoas. As tecnologias ligadas à saúde, desde as que se

referem às operações, aos exames, à monitorização contínua, à conceção e fabrico de medicamentos, são inúmeras, e todas elas envolvem energia durante a sua execução. Trata-se de uma área onde se assiste atualmente a desenvolvimentos significativos nessas tecnologias e onde a energia desempenha um papel fundamental nesse processo. Apontam-se como exemplos as seguintes tecnologias:

- **Tecnologias Implantáveis:** as pessoas estão a ficar cada vez mais conectadas a dispositivos, e esses dispositivos estão cada vez mais conectados aos seus corpos. Tais dispositivos, como os *pacemakers* e os implantes cocleares, não estão apenas a ser usados, mas também a ser implantados no corpo, permitindo a comunicação, a localização e a monitorização do comportamento, bem como a execução de funções relacionadas com a saúde. Os *pacemakers* e os implantes cocleares foram apenas o início, e estão constantemente a ser lançados muito mais dispositivos de saúde (Schwab 2017, 113). Quer no processo de captação de informação dos sinais do corpo humano, quer no processo de transmissão de sinais de informação, quer no processo de fabrico e de funcionamento deste tipo de dispositivos, a energia constitui um fator essencial;

- **Internet Vestível:** a tecnologia tornou-se cada vez mais pessoal. Primeiro, os computadores estavam instalados em grandes salas, mais tarde, nas secretárias e, depois, no nosso colo. Agora, já podemos encontrar tecnologia nos telemóveis que temos nos bolsos, e rapidamente será integrada diretamente na roupa e nos acessórios. Cada vez mais, a roupa e outros equipamentos usados por pessoas terão chips embutidos que conectam o artigo e a pessoa que o usa à Internet (Schwab 2017, 119), sendo a energia um elemento crucial no processo de captação e transmissão de sinais entre a roupa, o corpo humano e a internet;

## 2) Transportes:

A mudança dos combustíveis fósseis para a energia elétrica e para o hidrogénio como fonte de energia para os veículos constitui uma transição em curso na atualidade, prevendo-se que venha a ter um impacto

significativo no ambiente, na economia e na sociedade. A área dos transportes é uma área que tem um peso significativo na utilização de energia em todo o mundo, sendo por isso uma área onde o desenvolvimento tecnológico relacionado com a energia faz todo o sentido. Para além da transição do tipo de fontes de energia dos transportes, dos combustíveis fósseis para a energia elétrica e para o hidrogénio, interessa salientar dois tópicos tecnológicos que se relacionam com os transportes e com a energia por estes utilizada;

- **Cidades Inteligentes (Smart Cities):** prevê-se que num futuro próximo muitas cidades conectarão serviços, redes públicas e estradas à Internet (Schwab 2017, 133).



Figura 3.2: Figura esquemática de uma cidade inteligente (smart city), ilustrando a conexão entre os diversos serviços e elementos de uma cidade. (The Daily Star 2019)

Estas cidades inteligentes farão a gestão, entre outros elementos, da sua energia, do tráfego e dos transportes (Figura 3.2). A ligação entre estes elementos, através da internet, permitirá uma gestão mais eficiente da utilização da energia nos transportes, os quais poderão mais facilmente, por exemplo, receber informação sobre quais os trajetos que poderão fazer de modo a consumir menos energia, e sobre quais os postos de abastecimento de energia mais próximos;

- **Inteligência Artificial e Veículos sem Condutor:** a utilização de inteligência artificial em veículos, permitindo a circulação de veículos sem condutor, é algo que se afigura como uma realidade nos próximos anos. Este tipo de veículos têm potencial para serem mais eficientes e seguros do que os veículos com pessoas atrás de um volante (Schwab 2017, 137). Podem, entre outros fatores, reduzir os acidentes, os congestionamentos de tráfego e o consumo de energia dos veículos. Como tal, a utilização de inteligência artificial em veículos terá influência no desempenho energético dos mesmos.

### **3) Construção (de edifícios, espaços públicos e infra-estruturas):**

A atividade da construção é uma atividade de bastante intensidade energética, ou seja, consome uma quantidade significativa de energia. Importa por isso planeá-la e geri-la de maneira a que utilize a energia de um modo inteligente e eficiente. Apontam-se duas tecnologias com potencial para melhorar quer a atividade da construção, quer a gestão e a utilização de energia na atividade da construção:

- **Computação Ubíqua:** a computação está a tornar-se cada vez mais acessível dia após dia, e a capacidade de processamento nunca esteve tão disponível aos indivíduos – seja por meio de um computador com acesso à Internet, de um smartphone com 3G/4G ou de serviços na nuvem (Schwab 2017, 120). A computação ubíqua permite uma melhor gestão e utilização da energia na construção. Facilita o controlo da energia que é utilizada e o controlo da energia que é eventualmente produzida para a realização de uma obra, possibilitando a adoção de medidas que melhorem o desempenho energético da atividade da construção, minimizando o consumo de energia utilizada e maximizando a produção de energia renovável no local da obra. Pode ser contabilizada a energia que é consumida e produzida em obra pelas mais diversas máquinas e equipamentos (incluindo no futuro, as máquinas robóticas), utilizando dispositivos de leitura e processamento instalados nas próprias máquinas e equipamentos, as quais podem comunicar e interagir à distância, pela internet, com uma ou mais unidades de processamento centrais,

encarregues da gestão e controlo geral da obra e da energia utilizada no âmbito da mesma;

- **Robótica:** a utilização de robótica na construção (Figura 3.3) permitirá a automatização dos processos de construção dos edifícios, à semelhança do que já se verifica nos processos de fabrico de automóveis, onde a robótica já se encontra plenamente implementada, permitindo ganhos de eficiência no tempo e no rigor de fabrico dos automóveis. A robótica é uma área que irá consumir energia no processo de construção dos edifícios, mas que apresenta igualmente potencial para a produção de energia, nomeadamente produção de energia proveniente de fontes renováveis (tal como o sol) no envelope dos robots utilizados na construção.



Figura 3.3: Figura alusiva à utilização da robótica na construção.

(Robotic Industries Association 2018)

#### 4) Edifícios:

Os edifícios são responsáveis por 36% do consumo total de energia a nível mundial, de acordo com dados recentes da United Nations e da International Energy Agency (Nações Unidas e Agência Internacional da Energia), os quais se podem visualizar na Figura 3.4. A energia consumida em edifícios nos setores Residencial e Não-Residencial correspondeu, no ano de 2016, a 30% do valor total de consumo de energia no mundo, e a energia consumida pelo setor da Indústria da

Construção correspondeu a 6% desse mesmo valor total de consumo (United Nations Environment and International Energy Agency 2017, 14).

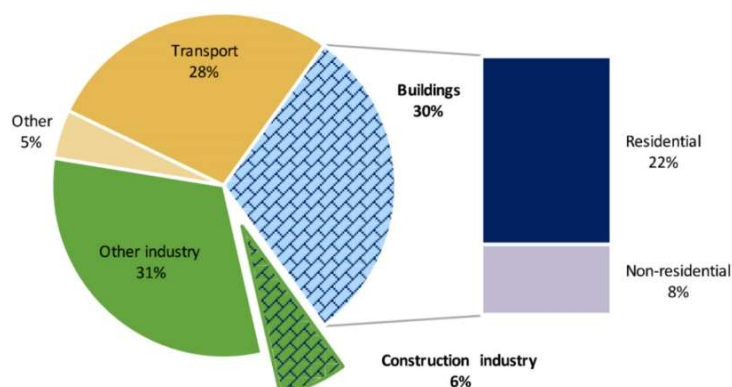


Figura 3.4: Percentagem do consumo de energia no mundo, por setor de atividade.  
(United Nations Environment and International Energy Agency 2017, 14)

Interessa por isso projetar os edifícios de modo a que utilizem a energia de um modo eficiente e que sejam eles mesmos capazes de gerar a própria energia que consomem, através do aproveitamento de energias renováveis endógenas (existentes no próprio local), como é o caso da energia solar e da energia eólica. Indica-se a seguir um desenvolvimento tecnológico que se prevê que tenha uma influência significativa no modo como a energia é utilizada nos edifícios:

- **A Casa Inteligente (Smart Home) ou Casa Conectada:** no século XX, a maior parte da energia que entrava em uma casa destinava-se ao consumo em aspetos como a iluminação, por exemplo. Contudo, ao longo do tempo, a quantidade de energia usada nesta e noutras necessidades eclipsou-se em muitos e mais complexos dispositivos, de torradeiras a máquinas de lavar, de televisões a aparelhos de ar condicionado (Figura 3.5). Além disso, estão a acontecer mudanças muito rápidas no campo da automatização residencial, permitindo às pessoas controlar luzes, sombras, ventilação, ar condicionado, áudio e vídeo, sistemas de segurança e eletrodomésticos (Schwab 2017, 131). Tudo isto de uma maneira integrada, através da utilização de sistemas em rede. Deste modo, o número de produtos e serviços que utilizam energia nos edifícios

é crescente, sendo essencial adotar medidas que permitam uma gestão eficiente da energia nos edifícios.

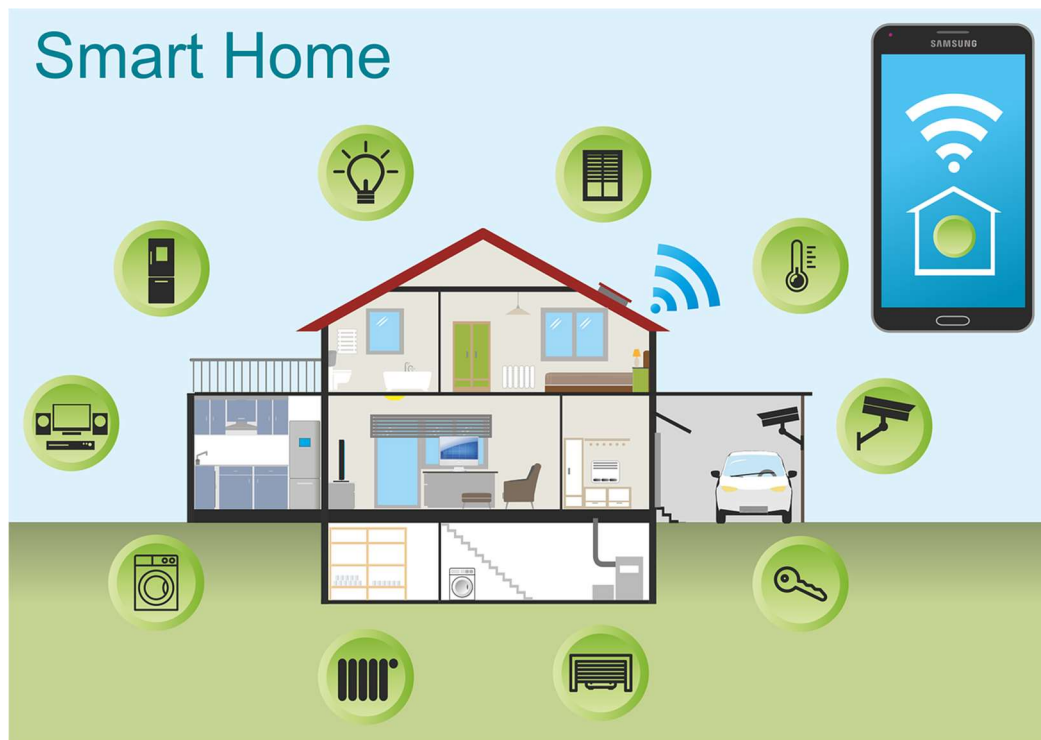


Figura 3.5: Figura esquemática de uma Casa Inteligente (Smart Home), ilustrando a conexão entre diversos dispositivos dentro de uma habitação. (ValueWalk 2019)

### 5) Internet das Coisas:

A possibilidade de comunicação e troca de informação que a internet permite foi fundamental para o desenvolvimento da sociedade do conhecimento nas últimas décadas. Estender a possibilidade de comunicação e a troca de informação às coisas e objetos que nos rodeiam irá permitir novos modos de interação entre as pessoas e as coisas que as rodeiam (como os edifícios, os eletrodomésticos, os veículos) e entre as próprias coisas entre si. Com o crescimento contínuo da capacidade de processamento e a queda dos preços do hardware, é economicamente viável conectar literalmente qualquer coisa à internet. Todas as coisas serão “inteligentes” e estarão ligadas à internet, permitindo maior comunicação e novos serviços, orientados por dados, e baseados no aumento das capacidades de análise desses mesmos dados (*analytics*). Os especialistas sugerem que no futuro qualquer produto (físico) poderá

ser conectado a uma infra-estrutura de comunicação ubíqua, e sensores ligados em todo o lado permitirão às pessoas perceber totalmente o seu ambiente (Schwab 2017, 128-129).

## **6) Computação Ubíqua e Inteligência Artificial:**

A computação e a inteligência artificial são áreas tecnológicas que têm tido um desenvolvimento significativo, prevendo-se que se venham a desenvolver também bastante no futuro próximo. Conforme referido anteriormente (ver área 3) Construção), a computação está a tornar-se omnipresente e ubíqua na vida das pessoas e no funcionamento da sociedade. No futuro, o acesso regular à internet e à informação deixará de ser um benefício das economias desenvolvidas, mas um direito básico tal como ter água potável. Portanto, qualquer pessoa em qualquer país será capaz de aceder e interagir com informação proveniente do canto oposto do mundo. A criação e a disseminação de conteúdos tornar-se-ão mais fáceis do que nunca (Schwab 2017, 121). Já no que diz respeito à inteligência artificial, para além da sua aplicação em veículos (ver área 2) Transportes), é uma tecnologia que pode ser aplicada nas mais diversas áreas de atividade. A característica essencial que melhor define esta tecnologia é a de que confere aos sistemas de computadores a capacidade de aprender com situações anteriores, de forma a apresentar sugestões e, no futuro, automatizar processos de decisão complexos, tornando mais fácil e mais rápido chegar a conclusões concretas baseadas em dados e experiências passadas (Schwab 2017, 138). A computação ubíqua e a inteligência artificial, para além de consumirem quantidades crescentes de energia no seu funcionamento à medida que aumenta a sua utilização, irão muito provavelmente ser responsáveis por realizarem uma gestão eficiente da geração e consumo de energia em diversas áreas de atividade humana e áreas tecnológicas.

## **7) Robótica:**

A robótica (Figura 3.6) é uma tecnologia que substitui o trabalho humano em muitas tarefas, desde as tarefas de fabrico de produtos até às tarefas domésticas. Está a começar a influenciar muitos empregos, da indústria à

agricultura, do retalho aos serviços. Os robôs estão a agilizar as cadeias de distribuição, o que se traduz em resultados comerciais mais eficientes e previsíveis (Schwab 2017, 142).

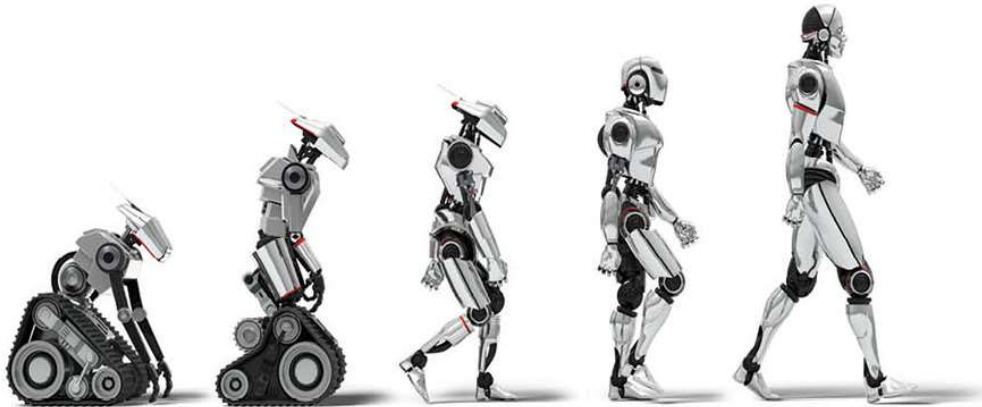


Figura 3.6: Figura ilustrativa da tecnologia robótica. (Robohub 2017)

Também na área de atividade da construção, como atrás referido (ver área 3) Construção), a robótica permitirá a automatização dos processos construtivos, proporcionando ganhos de eficiência no tempo e no rigor de execução das obras. A robótica é uma tecnologia que necessita de energia para que possa funcionar e desempenhar as suas tarefas, sendo de prever que apresente uma tendência de crescimento no que diz respeito ao consumo de energia em todo o mundo. Interessa por isso desenvolver tecnologias robóticas que tenham um desempenho energético eficiente. Inclusive, que tenham a capacidade de gerar em parte ou na totalidade a energia de que necessitam para funcionar.

### **8) Impressão 3D:**

O desenvolvimento da tecnologia de impressão 3D (Figura 3.7) permite descentralizar o processo de fabrico de produtos, da larga escala da produção em série da indústria para a pequena escala da personalização em série da loja ou mesmo da habitação. Permite, como tal, a elaboração de produtos personalizados, de acordo com as necessidades e os desejos

dos seus utilizadores. Os produtos em causa podem ser de qualquer tipo, desde infra-estruturas urbanas, edifícios, aviões, automóveis, mobiliário, louça cerâmica, ou mesmo órgãos humanos.



Figura 3.7: Imagem ilustrando a impressão 3D de uma ponte. (CityMetric 2018)

De um ponto de vista técnico, a impressão 3D, ou fabrico aditivo, é o processo de criar um objeto físico imprimindo-o camada por camada a partir de um desenho ou modelo digital. A impressão 3D tem potencial para criar produtos muito complexos, sem equipamentos complexos. As impressoras 3D serão capazes de fazer aquilo que, anteriormente, apenas uma fábrica inteira conseguiria. Atualmente, já estão a ser usadas numa enorme gama de aplicações, desde a produção de turbinas eólicas a brinquedos. Ao longo do tempo, as impressoras 3D irão ultrapassar os obstáculos da velocidade, do custo e do tamanho, e tornar-se-ão mais difundidas (Schwab 2017, 151). Uma característica importante da impressão 3D é que este tipo de impressão pode ser feito por qualquer pessoa com uma impressora 3D, sendo o processo de fácil execução. Assim, está criada a oportunidade para alguns dos típicos bens de consumo poderem ser impressos localmente e por pedido, em vez de serem comprados em lojas. Em algumas situações, para a impressão de

bens de consumo de menor dimensão e complexidade, uma impressora 3D irá poder ser utilizada como um dispositivo comum de escritório ou mesmo como um eletrodoméstico em uma habitação. A impressão 3D constitui por isso também uma área tecnológica onde se prevê que a utilização e o consumo de energia seja crescente, sendo como tal igualmente necessária a conceção e o fabrico de impressoras 3D que sejam energeticamente eficientes.

### **3.3 A importância da energia nos edifícios e no processo de projeto dos edifícios**

Os edifícios são responsáveis por 36% do consumo de energia em todo o mundo (United Nations Environment and International Energy Agency 2017, 14). Isso inclui a energia usada para controlar o clima nos edifícios e a usada para o funcionamento dos próprios edifícios, mas também a energia utilizada em eletrodomésticos, iluminação e outros equipamentos instalados. Para além disso, os edifícios utilizam e consomem energia, principalmente energia elétrica, em diferentes fases do seu ciclo de vida: construção, uso, e demolição. Importa por isso concebê-los de modo a que o seu desempenho energético seja eficiente. Deve-se procurar maximizar os ganhos de energia na geração de energia nos próprios edifícios, por meio das energias renováveis como a solar e a eólica, por exemplo, e procurar minimizar o consumo de energia através da adoção de medidas eficientes no que diz respeito ao consumo energético, por exemplo, posicionando corretamente o edifício para aproveitar os ganhos solares no interior do edifício e isolando térmicamente o envelope do edifício.

Existem políticas que procuram incentivar o desempenho energético dos edifícios. A União Europeia, por exemplo, elaborou a Diretiva 2010/31/UE, relativa ao Desempenho Energético dos Edifícios, estabelecendo o conceito de “Edifícios com necessidades quase nulas de energia”. A Diretiva 2010/31/UE contém um conjunto de princípios orientadores para que cada Estado Membro da União Europeia implemente medidas concretas no sentido de que os edifícios de cada Estado Membro se tornem “Edifícios com necessidades quase nulas de energia”.

Para que tal seja conseguido, é importante ter a noção de que existem diversas fases do ciclo de vida de um edifício. E de que cada fase do ciclo de vida apresenta um desempenho energético próprio, o qual contribui para o desempenho energético geral do ciclo de vida de um edifício.

Nos subcapítulos seguintes são descritas as características essenciais da Diretiva 2010/31/UE da União Europeia para o Desempenho Energético dos Edifícios e o conceito de “Edifícios com necessidades quase nulas de energia”, bem como as Fases do Ciclo de Vida dos Edifícios e a sua relação com o Desempenho Energético dos Edifícios.

### **3.3.1 A Diretiva da União Europeia para o Desempenho Energético dos Edifícios e o conceito de “Edifícios com necessidades quase nulas de energia”**

Têm sido desenvolvidas políticas que visam promover a eficiência no desempenho energético dos edifícios. A União Europeia, por exemplo, tem sido uma instituição ativa nesse aspeto. Um exemplo concreto da política que pretende implementar é a Diretiva 2010/31/UE do Parlamento Europeu e do Conselho da União Europeia, relativa ao desempenho energético dos edifícios.

A Diretiva 2010/31/UE, relativa ao desempenho energético dos edifícios, define o conceito de “Edifícios com necessidades quase nulas de energia”, em inglês “Nearly Zero Energy Buildings (NZEB)”, os quais são definidos como edifícios com um desempenho energético muito elevado. As necessidades de energia quase nulas ou muito pequenas deverão ser cobertas em grande medida por energia proveniente de fontes renováveis, incluindo energia proveniente de fontes renováveis produzida no local ou nas proximidades (Parlamento Europeu e Conselho da União Europeia 2010, L 153/18). Os “Edifícios com necessidades quase nulas de energia” são assim edifícios com um consumo energético reduzido, sendo esse consumo coberto pela produção de energia a partir de fontes renováveis locais ou na proximidade dos edifícios em questão. A Figura 3.8 ilustra o logótipo, desenvolvido pela União Europeia, para a promoção dos

“Edifícios com necessidades quase nulas de energia”, em inglês “Nearly Zero Energy Buildings (NZEB)”.

A mesma Diretiva 2010/31/UE estipula, no Ponto 1 do seu Artigo 9º, que os Estados Membros da União Europeia devem assegurar que:

- a) O mais tardar em 31 de Dezembro de 2020, todos os edifícios novos sejam edifícios com necessidades quase nulas de energia; e
- b) Após 31 de Dezembro de 2018, os edifícios novos ocupados e detidos por autoridades públicas sejam edifícios com necessidades quase nulas de energia.



Figura 3.8: Logótipo dos “Nearly Zero Energy Buildings (NZEB)”.  
(European Commission 2010)

Para além disso, os Estados Membros devem elaborar planos nacionais para aumentar o número de edifícios com necessidades quase nulas de energia. Os planos nacionais podem incluir objetivos diferenciados consoante a categoria de edifícios em causa (Parlamento Europeu e Conselho da União Europeia 2010, L 153/21).

À data da elaboração do documento da presente tese, no ano de 2020, alguns dos países membros da União Europeia já apresentaram um plano com uma definição prática para a aplicação dos “Edifícios com necessidades quase nulas de energia”. No caso de Portugal, verifica-se a existência de um “Plano nacional para aumentar o número de edifícios com necessidades quase nulas de energia

em Portugal”, elaborado pela Direção Geral de Energia e Geologia. Tal plano, publicado no ano de 2014, menciona que os “Edifícios com necessidades quase nulas de energia” sejam definidos muito provavelmente como um resultado de projetos de regulamentos tais como o Regulamento sobre o Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação (REH) e o Regulamento sobre o Desempenho Energético dos Edifícios para Comércio e Serviços (RECS) (Direção Geral de Energia e Geologia 2014, 6). Tais projetos de regulamentos concretizaram-se efetivamente com a elaboração do Decreto-Lei nº 118/2013, o qual visa assegurar e promover a melhoria do desempenho energético dos edifícios através do Sistema de Certificação Energética dos Edifícios (SCE), que integra o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação (REH), o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços (RECS), e transpõe para a ordem jurídica nacional a Diretiva nº 2010/31/UE do Parlamento Europeu e do Conselho da União Europeia, relativa ao desempenho energético dos edifícios.

O Decreto-Lei nº 118/2013 teve, à data da elaboração do documento da presente tese, diversas alterações, a última das quais consiste no Decreto-Lei nº 95/2019, do ano de 2019, e que estabelece a sexta alteração ao Decreto-Lei nº 118/2013.

Para proceder à pormenorização do conceito de “Edifício com necessidades quase nulas de energia”, aplicável no âmbito do ordenamento jurídico português, foram também elaboradas a Portaria nº 349-B/2013, relativa ao disposto no Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação (REH), e a Portaria nº 349-D/2013, relativa ao disposto no Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços (RECS), portarias essas que definem as metodologias para o cálculo do desempenho energético dos edifícios de habitação, comércio e serviços, de modo a que estes possam ser ou não ser considerados “Edifícios com necessidades quase nulas de energia”. A Portaria nº 297/2019 (4ª alteração à Portaria nº 349-B/2013) e a Portaria nº 42/2019 (2ª alteração à Portaria nº 349-D/2013) constituem as últimas alterações, à data da elaboração do documento da presente tese, às Portarias nº 349-B/2013 e nº 349-D/2013, respetivamente.

Os Decretos-Lei e Portarias acima mencionados formam um conjunto de documentos legais que permitem na prática o projeto de edifícios novos e a reabilitação de edifícios já existentes, em Portugal, de modo a que tais edifícios sejam “Edifícios com necessidades quase nulas de energia”. Tratam-se também de documentos que privilegiam a fase do projeto de edifícios para a eficiência do desempenho energético dos edifícios, seja essa fase de projeto referente ao projeto de edifícios novos ou à reabilitação de edifícios já existentes.

### **3.3.2 Fases do Ciclo de Vida dos Edifícios e a sua relação com o Desempenho Energético dos Edifícios**

A fase de projeto é determinante para a definição da eficiência do desempenho energético de um edifício, ao longo de todas as fases do seu ciclo de vida. O ciclo de vida de um edifício consiste em todas as fases que um edifício percorre ao longo da sua existência. E cada uma dessas fases tem o seu próprio desempenho energético.

Yüksek e Karadayi (2017, 94) propõem as seguintes três fases principais para a constituição do ciclo de vida de um edifício: a fase de pré-construção, a fase de construção e a fase de pós-construção. A fase de pré-construção refere-se à escolha do local onde o edifício deve ser construído, ao projeto do edifício, à escolha dos materiais de construção, à obtenção das matérias-primas para os materiais de construção, bem como ao fabrico e ao transporte dos materiais de construção. A fase de construção diz respeito aos processos de construção e de uso do edifício. A fase de pós-construção é a fase que ocorre após a fase de uso do edifício ser concluída. Trata-se de uma fase que inclui a demolição do edifício e a reciclagem dos materiais de construção, quando possível.

Ramesh, Prakash e Shukla (2010, 1593), para a elaboração de uma análise energética do ciclo de vida dos edifícios, propõem também três fases principais: a fase de fabrico, a fase de uso e a fase de demolição. A fase de fabrico inclui o fabrico e o transporte, dos materiais de construção e das instalações técnicas, utilizadas na construção e na renovação dos edifícios, bem como a própria construção e renovação dos edifícios. A fase de uso, a qual também pode ser

designada de fase de utilização, abrange todas as atividades relacionadas com o uso dos edifícios, ao longo da sua vida útil. Tais atividades incluem a manutenção das condições de conforto dentro dos edifícios. A última fase, a fase de demolição, inclui a destruição do edifício e o transporte dos materiais retirados para estações de reciclagem ou para aterros de lixo.

Ramesh, Prakash e Shukla não estabelecem uma fase similar à fase de pré-construção proposta por Yükses e Karadayi, por considerarem que a análise energética do ciclo de vida de um edifício só pode ser feita a partir do início do fabrico dos materiais de construção e do fabrico, ou construção, do edifício. Não consideram, por isso, a existência de uma fase de pré-construção. Apesar de a fase de pré-construção de um edifício, ou a fase de projeto, ser determinante para a definição do desempenho energético do edifício ao longo de todas as restantes fases do ciclo de vida do edifício.

No presente subcapítulo, presta-se atenção ao ciclo de vida total de um edifício, incluindo a fase de projeto, por se pretender focar a atenção em todas as fases que têm influência no desempenho energético de um edifício, não abordando apenas a análise do desempenho energético que os edifícios efetivamente têm na realidade a partir da sua fase de construção. Como tal, e por se entender ser mais claro deste modo, para a melhor perceção das atividades que ocorrem nas diferentes fases do ciclo de vida de um edifício, no presente subcapítulo é proposta a divisão do ciclo de vida de um edifício em quatro fases principais: A) Fase de projeto do edifício, B) Fase de construção do edifício, C) Fase de uso do edifício e D) Fase de demolição do edifício.

Existem diferenças relativamente à divisão do ciclo de vida proposta por Yükses e Karadayi, na medida em que na fase de construção do edifício por estes definida ocorrem as fases B) Fase de construção do edifício, e C) Fase de uso do edifício, propostas no presente subcapítulo. Por se considerar ser mais preciso, optou-se no presente subcapítulo por distinguir a fase de construção da fase de uso do edifício. Optou-se também por utilizar os termos fase de projeto do edifício e fase de demolição do edifício, em vez dos termos fase de pré-construção e fase de pós-construção, respetivamente, por se entender que os

primeiros termos são mais caracterizadores das atividades que ocorrem nessas fases.

FASES	ETAPAS
A) Fase de Projeto	a1. Escolha da localização do edifício a2. Definição da implantação do edifício a3. Definição da forma do edifício a4. Definição da organização espacial do edifício a5. Definição do envelope do edifício a6. Escolha dos materiais de construção a7. Definição do projeto paisagístico a8. Escolha dos recursos de energia renovável
B) Fase de Construção	b1. Fabrico dos materiais de construção b2. Transporte dos materiais de construção b3. Construção dos edifícios, incluindo a reabilitação dos mesmos
C) Fase de Uso	c1. Uso de eletricidade para aquecimento, arrefecimento, ventilação e iluminação c2. Uso de eletricidade para eletrodomésticos e aplicações eletrónicas c3. Outros usos de eletricidade
D) Fase de Demolição	d1. Demolição do edifício d2. Transporte dos materiais destruídos d3. Reciclagem e/ou depósito em aterros de lixo dos materiais destruídos

Figura 3.9: Tabela com as quatro fases principais propostas para o ciclo de vida dos edifícios.

Relativamente à divisão do ciclo de vida proposta por Ramesh, Prakash e Shukla, as diferenças da proposta do presente subcapítulo são as seguintes: optou-se pela designação de B) Fase de construção do edifício, em vez de fase de fabrico; e acrescentou-se também, como foi referido anteriormente, a fase A) Fase de projeto do edifício, às restantes três fases do ciclo de vida dos edifícios: B) Fase de construção do edifício, C) Fase de uso do edifício e D) Fase de demolição do edifício, equivalentes às fases de fabrico, de uso e de demolição, propostas por Ramesh, Prakash e Shukla.

A Figura 3.9 ilustra uma tabela com as quatro fases principais propostas no presente subcapítulo para o ciclo de vida dos edifícios, indicando as etapas, relativas a cada uma dessas fases, que têm impacto no desempenho e no consumo energético dos edifícios. Algumas dessas etapas têm influência também na produção de energia em edifícios. As etapas indicadas foram definidas no presente subcapítulo, baseando-se nas atividades referidas por Yüksek e Karadayi (2017, 95-118) e por Ramesh, Prakash e Shukla (2010, 1595) para o ciclo de vida de um edifício. A presente tese está centrada na Fase A) Fase de Projeto, mais concretamente nas Etapas a3. Definição da forma do edifício, a5. Definição do envelope do edifício e a8. Escolha dos recursos de energia renovável. As restantes fases e etapas não são por isso abordadas na presente tese. São de seguida descritas as características da Fase de Projeto, bem como as características das suas três etapas abordadas na presente tese:

#### A) Fase de Projeto:

A fase de projeto é a fase de conceção e planeamento do edifício, não apresentando qualquer tipo de desempenho energético. No entanto, é possível nesta fase adotar uma série de medidas, relativamente às etapas que a definem, de modo a que se assegure um bom desempenho energético do edifício, reduzindo as suas necessidades de consumo energético e rentabilizando ao máximo a possibilidade de produção de energia no edifício, por meio de fontes de energia renovável, como a energia solar. São indicados de seguida alguns fatores que se devem ter em consideração, para as três etapas que se relacionam com a investigação desenvolvida na presente tese:

##### → a3. Definição da forma do edifício:

A forma do edifício é um fator que influencia o desempenho energético de um edifício, nomeadamente o seu consumo e a sua produção de energia. No que diz respeito ao consumo de energia, a forma do edifício afeta consideravelmente o ganho e a perda de calor que ocorrem em um edifício, estando o ganho e a perda de calor diretamente relacionados com as necessidades de aquecimento e arrefecimento de um edifício, necessidades essas que são responsáveis, na maioria dos casos, pela

maior parte do consumo energético dos edifícios. A forma de um edifício pode ser definida através das variáveis geométricas que compõem o edifício, tais como a proporção entre o comprimento e a profundidade do edifício, a altura do edifício, o tipo de telhado (uma, duas ou mais águas), e a inclinação do telhado. O ganho e a perda de calor do edifício podem também aumentar e diminuir, dependendo da proporção entre as superfícies e o volume que constituem o edifício. O consumo energético do edifício é pois afetado pela forma geral do edifício e pelo fator de proporção entre as superfícies e o volume do edifício. Também a produção de energia é influenciada pela forma geral do edifício, e pela orientação desta relativamente à trajetória solar, no caso da produção de energia ser feita por meio da conversão de energia solar em energia elétrica. Como tal, existe uma relação direta entre a forma geométrica e o desempenho energético de um edifício, no que se refere ao seu consumo e à sua produção de energia. A definição da forma do edifício deve pois ser elaborada tendo em consideração esse facto;

→ a5. Definição do envelope do edifício:

O envelope do edifício diz respeito aos componentes do edifício tais como a cobertura, as paredes, o pavimento térreo, as janelas e as portas, os quais separam o interior do exterior de um edifício. No que diz respeito ao consumo energético, estes elementos, consoante a sua inércia térmica, permitem que a energia térmica seja transferida, em maior ou menor quantidade, para dentro ou para fora do edifício. Embora o custo de construção do envelope de um edifício represente normalmente 15 a 40% do custo total de construção do edifício, a sua contribuição para os custos do ciclo de vida, no que diz respeito ao custo da energia, é de cerca de 60% (Yüksek e Karadayi 2017, 99). O envelope do edifício desempenha o papel de um filtro entre as condições internas e externas do edifício, para controlar a entrada de ar, calor, frio e luz, devendo minimizar a perda de calor no inverno e o ganho de calor no verão. As características físicas e estruturais dos componentes do envelope do edifício têm pois um impacto significativo no consumo de energia do edifício. O desempenho térmico, a espessura e a côr dos materiais de construção utilizados nesses

componentes desempenham um papel significativo na regulação dos ganhos e das perdas de calor do edifício. No que diz respeito à produção de energia, a área do envelope do edifício que é reservada para a aplicação de tecnologia fotovoltaica influencia a quantidade de energia elétrica que o envelope do edifício poderá produzir. A quantidade de energia elétrica produzida será maior ou menor, consoante a taxa de conversão (de energia solar em energia elétrica) da tecnologia fotovoltaica aplicada, a dimensão, e a exposição à trajetória solar, da área do envelope do edifício projetada para esse efeito;

→ a8. Escolha dos recursos de energia renovável:

Para a produção de energia em edifícios, há que proceder com a escolha dos recursos de energia renovável, escolha essa que dependerá dos recursos que estiverem disponíveis e das opções do projetista. A disponibilidade dos recursos de energia renovável depende da localização do edifício em projeto, a qual determina a possibilidade de utilização, ou não utilização, dos diferentes tipos de recursos de energia renovável existentes. A energia solar, a energia eólica e a energia geotérmica constituem exemplos de recursos de energia renovável existentes. A presente tese aborda e utiliza apenas a energia solar.

Importa referir que o foco da presente tese está na fase de projeto dos edifícios, nomeadamente no projeto do envelope, mas o consumo de energia ocorre em todas as outras fases do ciclo de vida dos edifícios, a fase de construção, a fase de uso e a fase de demolição. A fase com mais impacto é a fase de uso dos edifícios, pois durante o ciclo de vida do edifício, o maior consumo de energia ocorre durante esta fase. Isso sucede porque o período temporal desta fase, o qual pode abranger 50 anos, é muito mais longo em comparação com as outras fases, a fase de construção e a fase de demolição. Tendo de ser assegurados, durante este período de tempo, os níveis de conforto necessários para a saúde humana, através do consumo de energia em equipamentos tais como os aparelhos de AVAC, os aparelhos de iluminação artificial, os eletrodomésticos e as aplicações eletrónicas. Como tal, em projetos de edifícios energeticamente eficientes, a fase de uso merece especial atenção.

De modo a tornar sustentável o consumo de energia na fase de uso, devem ser adotadas na fase de projeto medidas que minimizem o consumo de energia e que permitam que a energia consumida seja produzida nos próprios edifícios. Sendo a energia produzida proveniente de fontes de energia renovável (como a energia solar), em detrimento das fontes de energia fóssil. Para a minimização do consumo de energia e para a produção de energia através de fontes de energia renovável, devem ser utilizados métodos passivos, como a definição da forma e da orientação do edifício face à trajetória solar. Para a produção de energia através de fontes de energia renovável, devem ser utilizados também métodos ativos, como a utilização de tecnologia fotovoltaica para a transformação de energia solar em energia elétrica. Assim, apesar de a fase de uso do edifício ser aquela que tem um maior relevo no consumo energético do edifício ao longo do seu ciclo de vida, é a fase de projeto que determina, em larga medida, a quantidade de energia que o edifício irá consumir e produzir durante a sua fase de uso. Por isso, a conceção dos edifícios na fase de projeto dos mesmos assume um papel fundamental. É na fase de projeto de um edifício que se definem as características do edifício, no que diz respeito à sua forma, à sua orientação face à trajetória solar, à organização do seu espaço interior, às características do seu envelope e aos materiais de construção que utiliza. Tendo por isso a fase de projeto um impacto direto no desempenho energético do edifício na fase de uso do mesmo. Interessa que as decisões tomadas nesta fase assegurem que o consumo de energia seja minimizado e que a energia utilizada possa ser produzida no próprio edifício, através do recurso a energias renováveis, como a energia solar.

Importa ainda referir que são também as decisões que são tomadas na fase de projeto que irão determinar o método de construção e o método de demolição do edifício, e a energia que é consumida nas fases de construção e de demolição do edifício. As decisões e opções que são tomadas na fase de projeto influenciam assim todas as outras fases do ciclo de vida de um edifício: a construção, o uso e a demolição. Influenciando também o desempenho e o consumo energético que um edifício apresenta durante essas fases do seu ciclo de vida. A presente tese indica, conforme se verá nos capítulos seguintes, uma estimativa do consumo energético do edifício em projeto, apenas para a sua fase

de uso, não abordando o consumo energético efetuado durante as fases de construção e de demolição do edifício. No entanto, a temática do consumo energético realizado durante as fases de construção e de demolição de um edifício constitui motivo de interesse, podendo ser tema de outros trabalhos de investigação que complementem a presente tese. Assim sendo, conforme se constata através dos fatores acima mencionados, a fase de projeto constitui a fase determinante para o desempenho energético de um edifício, tendo impacto em todas as fases do ciclo de vida de um edifício. Importa por isso planear e elaborar a fase de projeto do modo mais eficiente e adequado possível.

A presente tese propõe integrar a energia e o desempenho energético, abordando a produção de energia, no processo de projeto de arquitetura dos edifícios, nomeadamente no processo de projeto de envelopes de edifícios. A intenção consiste em tornar a energia um elemento de conceção no processo criativo de projeto. Este tipo de método criativo levará a que se projetem, de um modo mais fácil, envelopes de edifícios que possibilitem que os edifícios a que se destinam alcancem, na sua fase de uso, um desempenho energético eficiente.

### **3.4 Proposta de um modelo tipo BEM (Building Energy Modeling) como suporte para o projeto de arquitetura de edifícios**

Na atualidade, a existência de diferentes tipos de profissionais que intervêm no projeto e na construção de edifícios, tal como os arquitetos, os engenheiros e os construtores, leva a que surjam dificuldades e problemas na troca de informação e comunicação entre os mesmos (Mateus et al. 2015, 1). O modelo de organização de informação tipo BIM (Building Information Modeling) constitui uma solução para esse problema, simplificando os processos de projeto e construção, e facilitando a troca de informação e comunicação entre os vários tipos de profissionais intervenientes nesses processos.

A energia, e a informação sobre o desempenho energético, é algo que interessa que esteja presente desde a fase de conceção até à fase de construção dos edifícios, sendo um fator que caracteriza os edifícios, para os diferentes tipos de

profissionais envolvidos no seu projeto e na sua construção. No entanto, a energia assume particular importância na fase de projeto dos edifícios, conforme foi referido no subcapítulo anterior: é nesta fase que se definem as principais características do edifício, principalmente no que diz respeito à sua forma e à sua orientação face à trajetória solar, vindo estes fatores a influenciar decisivamente o desempenho energético do edifício durante a fase de uso do seu ciclo de vida.

Tendo em consideração esses factos, na presente investigação, de modo a integrar a energia no processo de projeto de arquitetura de edifícios, têm-se em atenção dois aspetos:

1 - No processo de projeto habitual em arquitetura, as formas dos edifícios são concebidas de acordo com as intenções do projetista, tendo em conta a sua sabedoria, experiência e sensibilidade. As formas que este propõe para o edifício normalmente não são concebidas nem de um modo associado com o seu desempenho energético, nem diretamente relacionadas com outro tipo de informação, pelo menos de um modo rigoroso;

2 – Atualmente, um processo habitual de projeto consiste em conceber a forma dos edifícios recorrendo a instrumentos como esboços à mão, maquetes (Mateus et al. 2015, 5) e programas de computador que permitem liberdade formal e criativa, como o Rhinoceros, o SketchUp e o AutoCad. Após definir no essencial a forma que se pretende para o edifício, é que se procede para a associação de informação que caracteriza a forma projetada, recorrendo a programas de computador que aplicam o modelo de organização de informação tipo BIM (Building Information Modeling) para especificar em concreto quais os elementos construtivos (paredes, coberturas, lajes, vãos, painéis fotovoltaicos, entre outros) e quais os materiais de construção a incorporar no edifício. Os softwares BIM, ou seja, os programas de computador que aplicam o modelo tipo BIM, permitem também automatizar o processo de elaboração de informação técnica (plantas, cortes, alçados, perspetivas tridimensionais, mapas de vãos, entre outros) e compatibilizar a

informação contida no software em um formato de ficheiro IFC (Industry Foundation Classes) que é utilizável por todas as especialidades profissionais envolvidas no projeto e construção de um edifício, facilitando desse modo o processo de troca de informação e comunicação entre os diferentes especialistas, e diminuindo também o tempo de elaboração e o custo dos projetos de arquitetura e engenharia, bem como a construção, de um edifício. Assim sendo, verifica-se que existe atualmente uma quebra no processo de projeto de arquitetura, entre a fase de conceção e a fase de definição de informação relativa à forma concebida para o edifício, informação essa que se refere normalmente à indicação dos elementos construtivos (estrutura, cobertura, paredes, pavimentos) e dos materiais de construção. Utilizam-se habitualmente diferentes instrumentos, entre os quais diferentes softwares, na elaboração destas fases, o que provoca um aumento do tempo e do custo do projeto de arquitetura.

Tendo em conta a existência destes dois aspetos, o de o desempenho energético não estar habitualmente integrado no processo de conceção de um edifício, e o de a informação relativa à forma concebida para o edifício ser habitualmente definida numa fase posterior à fase de conceção, os quais podem constituir-se como problemas, propõe-se o seguinte: elaborar um tipo de modelo, que sirva como base para o desenvolvimento de software, e que integre a fase de conceção de um projeto de arquitetura com a lógica inerente a um modelo tipo BIM (Building Information Modeling), conferindo contudo maior destaque à informação energética, fazendo evoluir o modelo tipo BIM no sentido de um modelo tipo BEM (Building Energy Modeling). O modo como isso é feito é explicitado mais à frente nesta secção, nos parágrafos que descrevem as características do modelo tipo BEM. O modelo BEM justifica-se por a energia ser um fator essencial que caracteriza um edifício. Não apenas a energia elétrica que este produz e consome, mas também a energia que incorpora nos seus elementos construtivos (estrutura, cobertura, paredes, pavimentos) e materiais de construção.

Havendo desde a fase de conceção informação relativa ao desempenho energético (produção e consumo de energia) e à energia incorporada nos elementos construtivos e materiais de construção, o projetista pode lidar com este tipo de informação de um modo criativo na elaboração das soluções de arquitetura para o edifício projetado, tendo desde logo noção sobre o impacto ambiental e energético do edifício. Pode pois criar mais facilmente soluções para o edifício que sejam eficientes nesse aspeto. Ao mesmo tempo, diminui o tempo de elaboração e o custo de um projeto de arquitetura, pois o processo de elaboração da informação técnica é automatizado a partir da fase de conceção. Tradicionalmente, um modelo e um software tipo BIM é composto pelas etapas descritas na Figura 3.10.

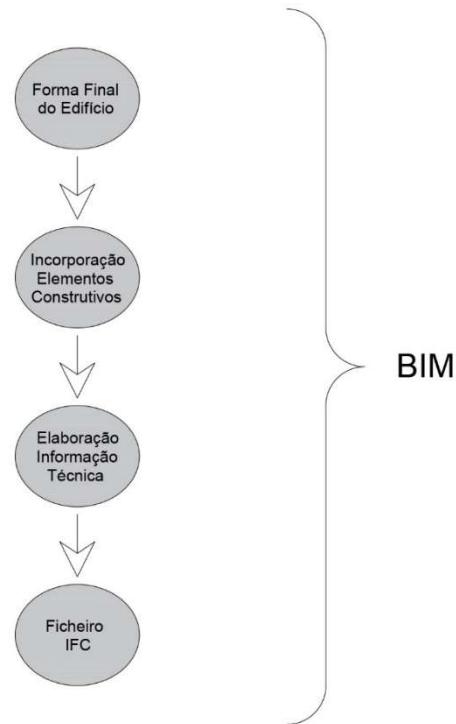


Figura 3.10: Etapas do processo tradicional de trabalho em um modelo tipo BIM.

Quando se inicia o processo de modelação em um software elaborado segundo o modelo tipo BIM, na maior parte dos casos, a Forma Final do Edifício já se encontra definida pelo projetista, pelo que o processo de modelação em BIM corresponde habitualmente a uma Incorporação dos Elementos Construtivos, integrando-se na forma pretendida os elementos construtivos e os materiais com

que se pretende construir o edifício. Segue-se a etapa de Elaboração da Informação Técnica, em que se elaboram todos os documentos técnicos necessários para a comunicação do projeto (plantas, cortes, alçados, perspetivas tridimensionais, mapas de vãos, entre outros), os quais estão sincronizados com o modelo tridimensional (modelo 3D) do edifício. Qualquer alteração no modelo 3D é automaticamente atualizada nos documentos técnicos, bem como qualquer alteração nos documentos técnicos é automaticamente atualizada no modelo 3D.

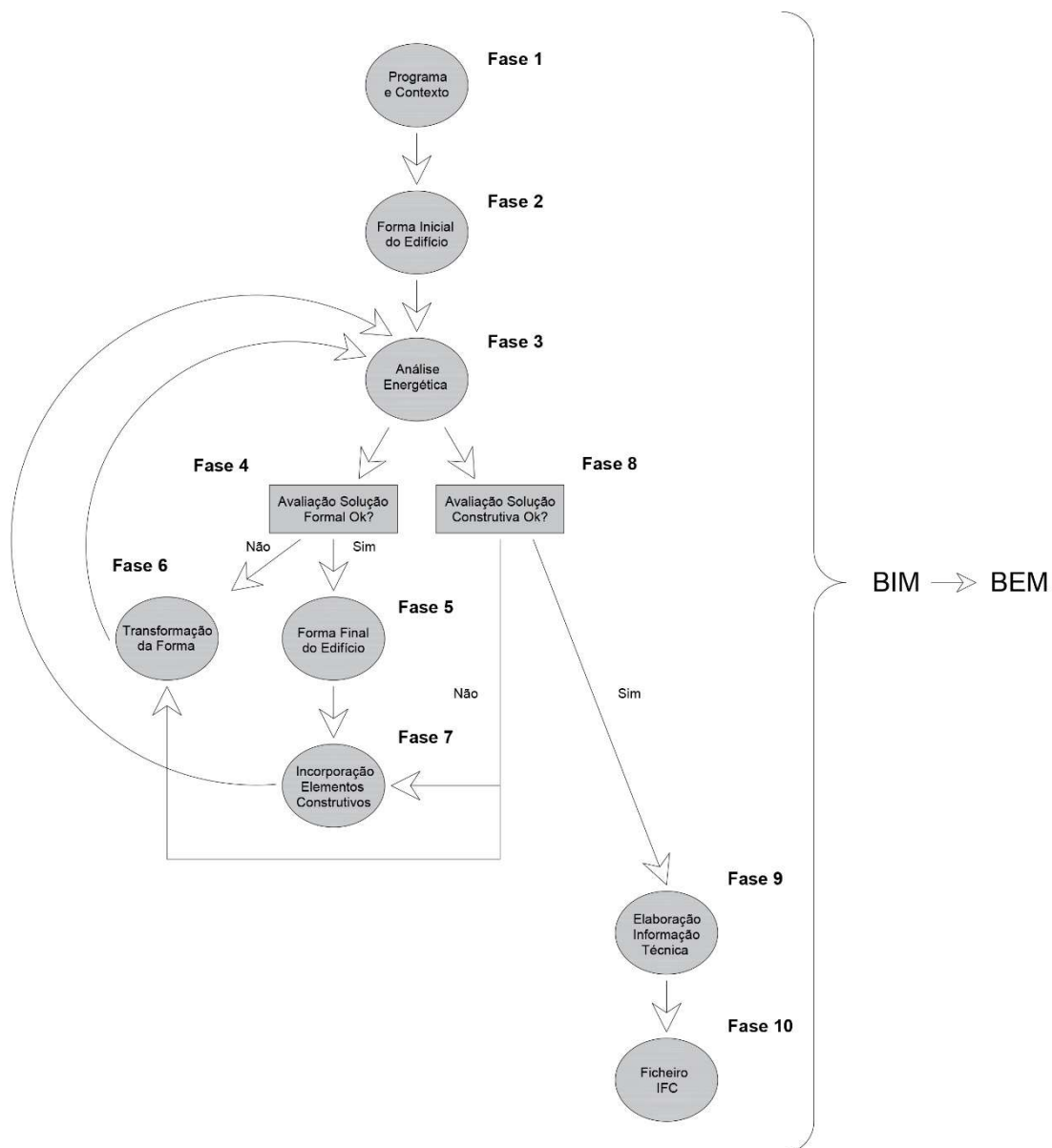


Figura 3.11: Etapas do processo proposto de trabalho em um modelo tipo BEM.

De modo a se alcançar a integração proposta entre a fase de concepção de um projeto de arquitetura com a lógica inerente a um modelo tipo BIM (Building Information Modeling), conferindo contudo maior destaque à informação energética, propõe-se a constituição de um modelo tipo BEM, de acordo com o descrito na Figura 3.11. O modelo proposto contém assim um processo de trabalho que integra as componentes conceptual e de desempenho energético. As fases que o compõem são as seguintes:

- **Fase 1:** é definido o Programa e o Contexto do edifício. O programa refere-se às exigências funcionais do edifício, sendo definidos fatores como a tipologia do edifício (habitação, serviços, comércio, uso misto), as funções que os espaços do edifício devem ter, as áreas pretendidas para os seus espaços, entre outros. O contexto refere-se, por um lado, ao contexto legal, nomeadamente às exigências dispostas em regulamentos legais que o edifício tem de cumprir, tendo em conta a sua localização geográfica, sendo definidos fatores como a área de implantação máxima, a área bruta de construção máxima, o número máximo de pisos, o limite da cêrcea, entre outros. Por outro lado, o contexto refere-se também ao contexto ambiental relativo ao local em que o edifício se insere, sendo definidos fatores como a radiação solar, a temperatura, as direções e intensidades do vento, entre outros;
- **Fase 2:** é definida uma forma inicial para o edifício, tendo em conta as exigências definidas na Fase 1;
- **Fase 3:** é feita uma análise energética, analisando-se o desempenho energético da forma inicial do edifício. A análise é feita para a irradiação solar incidente no envelope do edifício, para uma estimativa da quantidade de energia elétrica gerada por tecnologia fotovoltaica aplicada em uma percentagem da área do envelope do edifício, e para uma estimativa do consumo de energia elétrica no edifício;
- **Fase 4:** é feita a avaliação da solução formal para o edifício, no que diz respeito aos valores obtidos para o desempenho energético, nomeadamente para os aspetos referidos na fase 3. Caso o valor seja

satisfatório, prossegue-se para a Fase 5. Caso contrário, prossegue-se para a Fase 6;

- **Fase 5:** sendo os valores obtidos, sobre a forma em análise, satisfatórios, a forma é aceite como Forma Final, avançando-se para a Fase 7;

- **Fase 6:** não sendo satisfatórios os valores obtidos sobre a forma em análise, procede-se a um processo de transformação da forma. Após realizado este processo, a forma resultante é de novo submetida à Fase 3, em que se analisa de novo o desempenho energético da mesma. O ciclo Fase 3 → Fase 4 → Fase 6 → Fase 3 repete-se até se alcançarem valores satisfatórios para o desempenho energético;

- **Fase 7:** são incorporados os elementos construtivos (estrutura, cobertura, paredes, pavimentos, portas, janelas) e os materiais de construção na forma aceite como Forma Final para o edifício. Avança-se para a Fase 8;

- **Fase 8:** é realizada a avaliação da solução construtiva, após incorporados os elementos construtivos e os materiais de construção no edifício, no que diz respeito aos valores obtidos para a quantidade de energia elétrica gerada por tecnologia fotovoltaica aplicada em uma área do envelope do edifício, e para o consumo de energia elétrica no edifício. Se os valores forem satisfatórios prossegue-se para a Fase 9. Caso contrário, ativa-se a Fase 6 (Transformação da Forma) ou a Fase 7 (Incorporação dos Elementos Construtivos). Os ciclos Fase 6 → Fase 3 → Fase 4 e Fase 7 → Fase 3 → Fase 8 repetem-se sucessivamente até se alcançarem valores satisfatórios para os aspetos analisados. Após este valor ser aceite na Fase 8, prossegue-se para a Fase 9;

- **Fase 9:** é executado o processo de Elaboração da Informação Técnica, sendo feitos os documentos técnicos necessários para a formalização do projeto do edifício, nomeadamente plantas, cortes, alçados, perspetivas tridimensionais, mapa de vãos, mapa de quantidades de materiais, entre outros. Após concluído este processo, avança-se para a Fase 10;

- **Fase 10:** é feito o ficheiro IFC (Industry Foundation Classes), o qual contém toda a informação do projeto do edifício, no formato de ficheiro informático comum que é utilizado por todas as especialidades profissionais intervenientes no projeto de arquitetura e na construção do edifício.

Como se pode constatar, é dada especial relevância à análise energética e à conceção da forma na metodologia proposta, ampliando-se desse modo as capacidades de um modelo tipo BIM. Estabelece-se assim uma evolução de um modelo tipo BIM (Building Information Modeling) para um modelo tipo BEM (Building Energy Modeling), assumindo-se a energia como um fator essencial para a informação acerca das características de um edifício.

As fases para o projeto de edifícios propostas pelo modelo tipo BEM apresentado podem ser aplicadas para o projeto de diferentes tipologias de edifícios. A metodologia do modelo BEM apresentado pretende ser válida para diferentes tipologias de edifícios, sejam elas de habitação, comércio, serviços, uso misto (habitação com comércio e/ou com serviços), ou equipamentos.

A Fase 1 do modelo BEM permite definir o programa funcional, o contexto legal e o contexto ambiental do edifício, em que são estabelecidas as características do programa do edifício a projetar, as condicionantes legais para o projeto do edifício, bem como os fatores ambientais que podem influenciar o projeto do edifício. Para tipologias diferentes de edifícios, os fatores que caracterizam o contexto ambiental são comuns: a radiação solar, a temperatura, as direções e intensidade do vento, entre outros. Também para tipologias diferentes de edifícios, muitos dos fatores que caracterizam o contexto legal dos edifícios são comuns, sendo disso exemplo o factor da área de implantação máxima, o factor da área bruta de construção máxima, o factor do limite da cêrcea, entre outros. Contudo, para tipologias diferentes de edifícios, existem características do programa que são distintas. Por exemplo, as funções dos espaços são diferentes, conforme a tipologia do edifício seja de habitação ou de serviços. Se a tipologia for de habitação, as funções dos espaços poderão ser quartos, cozinhas, salas de estar, salas de refeições, casas de banho, entre outros. Se a

tipologia for de serviços, as funções dos espaços poderão ser gabinetes, salas de reuniões, entre outros. Tendo isso em atenção, a Fase 1 do modelo BEM proposto pretende permitir definir as características do programa, do contexto legal e do contexto ambiental para diferentes tipologias de edifícios.

A Fase 2 do modelo BEM permite definir a forma inicial do edifício em projeto, tendo em conta o programa, o contexto legal, o contexto ambiental e a visão arquitetónica do projetista. A forma inicial pode ser qualquer forma que o projetista pretenda, para as variadas tipologias de edifícios.

Esta metodologia proposta para o modelo BEM, de definição da Fase 1 e da Fase 2 do modelo, assemelha-se à metodologia de projeto que é tradicionalmente adotada no projeto de edifícios (Merritt and Ricketts [1958] 2000, 1.5), independentemente da sua tipologia. Na primeira etapa são definidos o programa funcional do edifício, elaborado de acordo com os requisitos do cliente (Merritt and Ricketts [1958] 2000, 1.5), e o contexto legal do edifício, estabelecido por regulamentos legais que restringem o projeto do edifício (Merritt and Ricketts [1958] 2000, 1.36), seja a tipologia do edifício de habitação, comércio, serviços, ou outra. É também definido o contexto ambiental do edifício, recolhendo-se informação acerca das condições climáticas do local para onde o edifício é projetado. Após essa etapa, segue-se uma segunda etapa, onde o arquiteto define, de um modo progressivo, de acordo com a etapa anterior e com a sua visão arquitetónica, a forma geral do edifício, forma essa que é desenhada consoante os alinhamentos, as vistas pretendidas ou outros fatores que o arquiteto entenda como pertinentes. A Fase 1 e a Fase 2 do modelo BEM proposto procuram assim albergar o método de projeto tradicional dos arquitetos na conceção de edifícios, e não estabelecer uma metodologia própria para a conceção de edifícios.

O modelo tipo BEM proposto serve como referência para a investigação realizada na presente tese. Contudo, a investigação na presente tese aborda apenas as fases do modelo BEM até à Fase 6 inclusive, efetuando também apenas, no que se refere à análise energética, a análise da irradiação solar incidente no envelope do edifício. Não são abordadas a Fase 7, que se refere à

incorporação dos elementos construtivos, nem as fases daí em diante. Não são também efetuadas a análise da quantidade de energia elétrica gerada pela aplicação de tecnologia fotovoltaica em uma percentagem da área do envelope, nem a análise do consumo energético do edifício. Também é investigado apenas o projeto do envelope de edifícios (cobertura e fachadas), e não o projeto completo de arquitetura de edifícios.

Na atual fase de investigação, o modelo tipo BEM proposto encontra-se focado na relação entre forma, programa e desempenho energético, tendo em vista maximizar a irradiação solar incidente sobre o envelope do edifício. Os elementos construtivos e os materiais de construção são importantes na medida em que permitem concretizar e construir as formas definidas nas fases iniciais do modelo BEM proposto, tendo também impacto no que se refere ao consumo e à geração de energia no edifício, encontrando-se por isso previstos na Fase 7 do modelo BEM, a qual se espera desenvolver, em conjunto com as Fases 8 a 10, numa fase posterior de investigação.

Importa também referir que o modelo tipo BEM proposto pretende ser um complemento ao modelo tipo BIM e não uma alternativa. Assim sendo, interessa destacar os seguintes aspetos, relativos às suas características:

→ o primeiro aspeto refere-se ao facto de que o modelo BEM proposto constitui-se como um complemento ao modelo BIM, na medida em que integra uma componente de análise de desempenho energético, assemelhando-se deste modo a um modelo BIM+EnergyPlus (software de simulação energética) ou BIM+Ladybug (software de simulação energética para o software Grasshopper), no que se refere a este aspeto da análise do desempenho energético;

→ o segundo aspeto consiste em que o modelo BEM proposto contém operações de geração de soluções formais que melhoram diretamente o desempenho energético de um edifício. Passando a explicitar: as operações de geração de soluções formais, no modelo BEM, permitem melhorar o desempenho energético do edifício projetado, pois tratam-se de operações que foram concebidas, e programadas posteriormente em

software, tendo como propósito essa finalidade. Por exemplo, a operação de normalização de uma superfície do envelope de um edifício, ao tornar uma superfície perpendicular aos raios solares para uma determinada hora de um dia do ano, permite melhorar o desempenho energético da superfície e do envelope do edifício no seu todo. Trata-se de um exemplo de uma operação de geração de solução formal que permite melhorar de um modo imediato o desempenho energético do edifício.

De modo a melhor explicitar o modelo BEM proposto, o qual tem como base o modelo BIM, constituindo um seu complemento, indicam-se também um conjunto de exemplos de softwares existentes na atualidade que poderão compor o modelo BEM:

→ o software Revit, de modelo BIM, em conjunto com o software de programação visual Dynamo e o software de programação textual Python, este último de modo a permitir a elaboração de código que: 1) permita a análise do desempenho energético do edifício, ou que permita a execução de softwares já existentes de análise do desempenho energético, tais como o Radiance ou o EnergyPlus; 2) permita a programação de operações de geração de soluções formais que melhorem o desempenho energético de um edifício;

→ o software de modelação de geometria Rhinoceros 3D, em conjunto com o software de programação visual Grasshopper, com o software de modelo BIM VisualARQ (executado no Grasshopper) e com o software de programação textual Grasshopper Python (executado no Grasshopper), em que este último permite a elaboração de código que: 1) permita a análise do desempenho energético do edifício, ou que permita a execução de softwares já existentes de análise do desempenho energético, tais como o Radiance ou o EnergyPlus; 2) permita a programação de operações de geração de soluções formais que melhorem o desempenho energético de um edifício.

Contudo, o modelo tipo BEM proposto também pode servir para a elaboração de novo software, o qual integre ou algumas, ou a totalidade das valências dos softwares acima indicados.

### **3.5 Síntese do Capítulo**

É descrita neste capítulo a visão do Projeto baseado em Energia, sendo proposta uma linha de investigação nesta área. A visão e linha de investigação do Projeto Baseado em Energia justifica-se pela importância que a energia desempenhou e desempenha para o ser humano e para a sociedade ao longo da história. São referenciadas áreas de atividade humana e áreas tecnológicas onde a energia se destaca e onde se prevê que o desenvolvimento de produtos e serviços com um eficiente desempenho energético, aplicando o Projeto baseado em Energia, possa constituir um importante contributo para a diminuição da pegada ecológica e para o aumento da qualidade de vida do ser humano. No setor específico dos edifícios, é indicado o enquadramento legal para a elaboração de edifícios com um eficiente desempenho energético, sendo referido o conceito de “Edifícios com necessidades quase nulas de energia”. São definidas as fases do ciclo de vida dos edifícios, e indicada a sua relação com o desempenho energético dos edifícios. É também destacada a importância de integrar a energia, e o desempenho energético, na fase de projeto de arquitetura dos edifícios, de modo a que se possam conceber edifícios com um desempenho energético eficiente. A finalizar, como consequência dos fatores descritos anteriormente, é proposto um modelo tipo BEM (Building Energy Modeling) que sirva de referência para a elaboração de software que permita suportar o projeto de arquitetura de edifícios com um desempenho energético eficiente.

Podem ser deduzidos deste capítulo os seguintes contributos para o conhecimento e para a prática da Arquitetura:

- A definição de uma visão e de uma linha de investigação para a disciplina da Arquitetura, o Projeto baseado em Energia, que incorpora a energia como elemento de conceção e criatividade na disciplina da Arquitetura. O Projeto baseado em Energia pode também ser aplicado às disciplinas do Urbanismo e do Design, pois o seu princípio fundamental, o de que a energia pode ser um

elemento conceptual e criativo, é válido para todas as disciplinas, sejam elas de âmbito artístico ou mesmo de âmbito científico.

- A constituição de um enquadramento teórico sobre a energia, no que diz respeito aos seguintes fatores:

- a importância que a energia teve e tem para o ser humano e para a sociedade ao longo da história;

- algumas das áreas de atividade humana e das áreas tecnológicas onde se prevê que a energia possa assumir um papel fundamental para o desenvolvimento de produtos e serviços com um eficiente desempenho energético, contribuindo desse modo para uma diminuição da pegada ecológica e para um aumento da qualidade de vida do ser humano;

- a importância da energia nos edifícios e no processo de projeto dos edifícios, sendo: 1) indicado o enquadramento político e legislativo para promover o desempenho energético eficiente dos edifícios, em que é estabelecido o conceito de “Edifícios com necessidades quase nulas de energia”; 2) indicadas as Fases do Ciclo de Vida dos Edifícios, estabelecendo-se uma relação entre as mesmas e o desempenho energético dos edifícios.

- A definição de um modelo do tipo BEM (Building Energy Modeling) que sirva de base ao desenvolvimento de software que suporte o projeto de arquitetura de edifícios com um desempenho energético eficiente. O modelo tipo BEM definido destaca a energia como informação essencial para o processo de projeto em arquitetura, e como um fator determinante para a formação das soluções formais e construtivas dos edifícios.

## 3.6 Referências do Capítulo 3

**Brynjolfsson, Erik and Andrew McAfee.** 2014. *The Second Machine Age: Work, Progress, and Prosperity in a Time of Brilliant Technologies*. New York: W. W. Norton & Company.

**Direção Geral de Energia e Geologia.** 2014. “National plan for increasing the number of nearly zero-energy buildings in Portugal”.

**Mateus, Daniel, Maurício Sousa, Rui de Klerk, Sandra Gama, Joaquim Jorge, and José Pinto Duarte.** 2015. “From Tecton to Technos: going back to the classical roots of Architecture using virtual reality”. In *Real Time Extending the Reach of Computation – Proceedings of the 33th eCAADe Conference, 16-18 September, 2015*, edited by Bob Martens et al., 107-116. TU Wien, Austria.

**Merritt, Frederick S. and Jonathan T. Ricketts.** [1958] 2000. *Building Design and Construction Handbook*. United States of America: McGraw-Hill Professional, 6th edition.

**Parlamento Europeu e Conselho da União Europeia.** 2010. “Directiva 2010/31/UE do Parlamento Europeu e do Conselho”. *Jornal Oficial da União Europeia* 18.06.2010: L 153/13-L 153/35.

**Ramesh, T., Ravi Prakash and K.K. Shukla.** 2010. “Life cycle energy analysis of buildings: An overview”. *Energy and Buildings* 42: 1592-1600.

**Schwab, Klaus.** 2017. *A Quarta Revolução Industrial*. Lisboa: LEVOIR.

**United Nations Environment and International Energy Agency.** 2017. “Towards a zero-emission, efficient and resilient buildings and construction sector”. Global Status Report 2017.

**Yüksek, Izzet, and Tülay Tikansak Karadayi.** 2017. “Energy-Efficient Building Design in the Context of Building Life Cycle”. In *Energy Efficient Buildings*, edited by Eng Hwa Yap, 93-123. London: IntechOpen.



# **CAPÍTULO 4**

## **Projeto Digital de Envelopes de Edifícios: Âmbito, Sistema, Metodologia e Instrumentos**



## CAPÍTULO 4

# Projeto Digital de Envelopes de Edifícios: Âmbito, Sistema, Metodologia e Instrumentos

O presente capítulo aborda um caso de estudo específico do Projeto baseado em Energia: o Projeto Digital de Envelopes de Edifícios. São definidos o âmbito do Projeto Digital de Envelopes de Edifícios, o sistema que o organiza, a metodologia para a sua elaboração e os instrumentos conceptuais que permitem a sua execução.

### 4.1 Âmbito

O Projeto Digital de Envelopes de Edifícios refere-se a uma área específica do projeto de arquitetura. Diz respeito ao projeto, auxiliado por meios digitais, do envelope dos edifícios, formado pelas fundações, fachadas e cobertura. Importa referir que na presente tese, de um ponto de vista filosófico e conceptual, os envelopes dos edifícios são entendidos como “peles” (Figura 4.1).

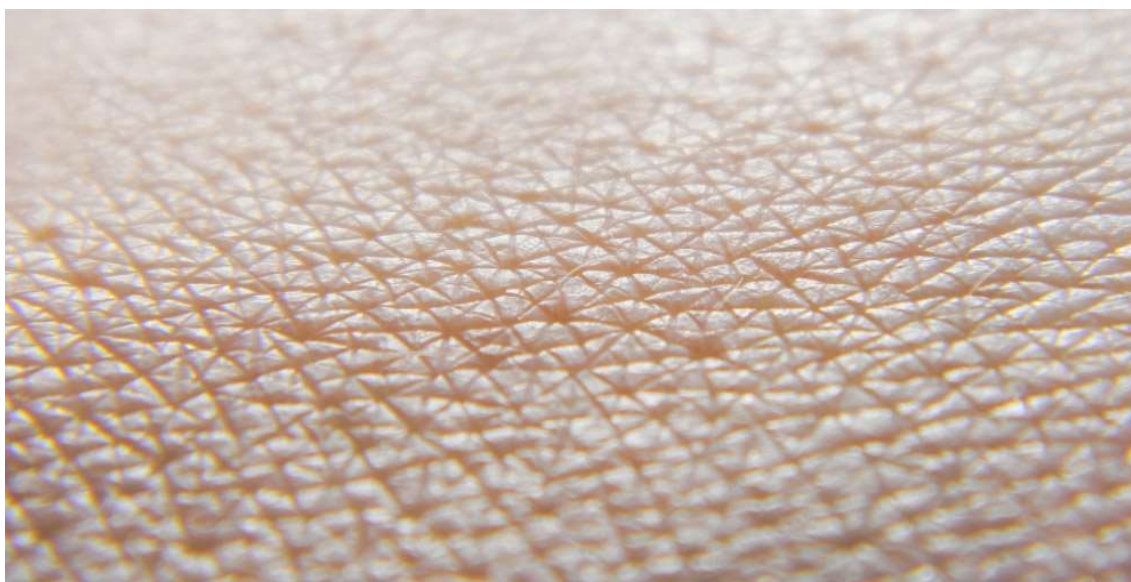


Figura 4.1: Imagem da pele humana vista de perto. A pele é o maior órgão do corpo humano. Exerce inúmeras e múltiplas funções, tais como: regulação térmica, defesa orgânica, produção de vitamina D, proteção contra diversos agentes do meio ambiente e funções sensoriais (calor, frio, pressão, dor e tato). (Clínica Luz 2009)

São-lo, com o objetivo de estabelecer um significado e uma semântica para essa zona dos edifícios. A palavra “pele” constitui uma metáfora que caracteriza o envelope. Estabelece o seu sentido como uma zona que define o limite e a forma do edifício, regulando e controlando os processos energéticos que ocorrem entre o meio e o interior do edifício. Trata-se de uma “pele” artificial (daí a utilização das aspas) criada pelo ser humano, que à semelhança da pele que protege o seu corpo, cria estas outras “peles” dos edifícios para assegurar melhor conforto e qualidade de vida. A pertinência de um Projeto Digital de Envelopes de Edifícios justifica-se pelos seguintes motivos:

**1 – O envelope é a zona com maior impacto no consumo energético dos edifícios:** os edifícios são responsáveis por 36% do valor total de consumo de energia em todo o mundo (United Nations Environment and International Energy Agency 2017, 14). O envelope é a zona dos edifícios que maior influência tem no consumo, nomeadamente através da sua forma e dos materiais que o constituem. Interessa por isso projetar, construir e reabilitar o envelope dos edifícios de modo a torná-los mais eficientes no que se refere ao consumo energético;

**2 – Crescente geração de energia renovável em meio urbano:** a economia mundial defronta-se na atualidade com dois grandes desafios: a obtenção de energia a preços competitivos e a crescente necessidade de recursos energéticos. Nesse contexto, através da análise dos dados publicados na Internet por Ritchie e Roser (2019), é possível verificar que no panorama mundial existe uma crescente aposta na utilização de energias renováveis (provenientes do sol, vento, massas de água, biomassa, entre outros). Em 2010, por exemplo, foram gerados e consumidos menos de 50 terawatts-hora (TWh) de energia em todo o mundo, proveniente do sol, enquanto que em 2016 esse valor já excedia 300 terawatt-hora, o que representa um crescimento de mais de 600% apenas em seis anos, no que diz respeito à geração e ao consumo de energia proveniente do sol. Parte da quantidade das energias renováveis em causa são endógenas, ou seja, são geradas no próprio local geográfico onde ocorre a sua utilização. Assim sendo, no meio urbano faz sentido incentivar a geração de energia renovável nos edifícios, de modo

a que estes gerem, no mínimo, a energia que consomem. Com esta forma dispersa de obtenção de energia, minimizam-se os custos económicos e ambientais da geração de energia, e aumentam-se e diversificam-se as fontes para a sua obtenção. O local dos edifícios de maior potencial para a geração de energia consiste no seu envelope, o qual se encontra exposto à energia solar. A energia solar é considerada a energia renovável de maior preponderância, sendo possível transformá-la em energia elétrica através da utilização da tecnologia fotovoltaica, por exemplo. Assim sendo, importa projetar, construir e reabilitar o envelope dos edifícios de modo a torná-los mais eficientes não apenas no que se refere ao consumo energético, mas também no que diz respeito à geração de energia elétrica;

**3 – Utilização de instrumentos digitais no projeto, construção e reabilitação de envelopes de edifícios:** por ser necessário para o projeto do envelope dos edifícios a utilização de elementos como a trajetória solar, o cálculo da energia solar incidente, o cálculo do consumo de energia e a geração e transformação da geometria do envelope, pretende-se recorrer ao uso de instrumentos digitais como o computador para o projeto do envelope de edifícios. Daí a designação deste tipo de projeto por Projeto Digital de Envelopes de Edifícios.

## 4.2 Sistema

Para a elaboração de um tipo de projeto designado por Projeto Digital de Envelopes de Edifícios, é necessário lidar com informação e dados, muitos deles digitais, provenientes de tipos de projetos que se localizam a montante (a um nível hierárquico superior) e a jusante (a um nível hierárquico inferior). Por isso, de modo a estabelecer um enquadramento para o Projeto Digital de Envelopes de Edifícios, recorre-se à formação de um sistema, o qual organiza a informação e os dados entre este tipo de projeto e os tipos de projeto a montante e a jusante. Entende-se designar este sistema por Sistema Arquitetura-Envelopes de Edifícios (em abreviatura Sistema AE), pelo facto de enquadrar o projeto do envelope como parte integrante do projeto de arquitetura do edifício no seu todo (Figura 4.2).

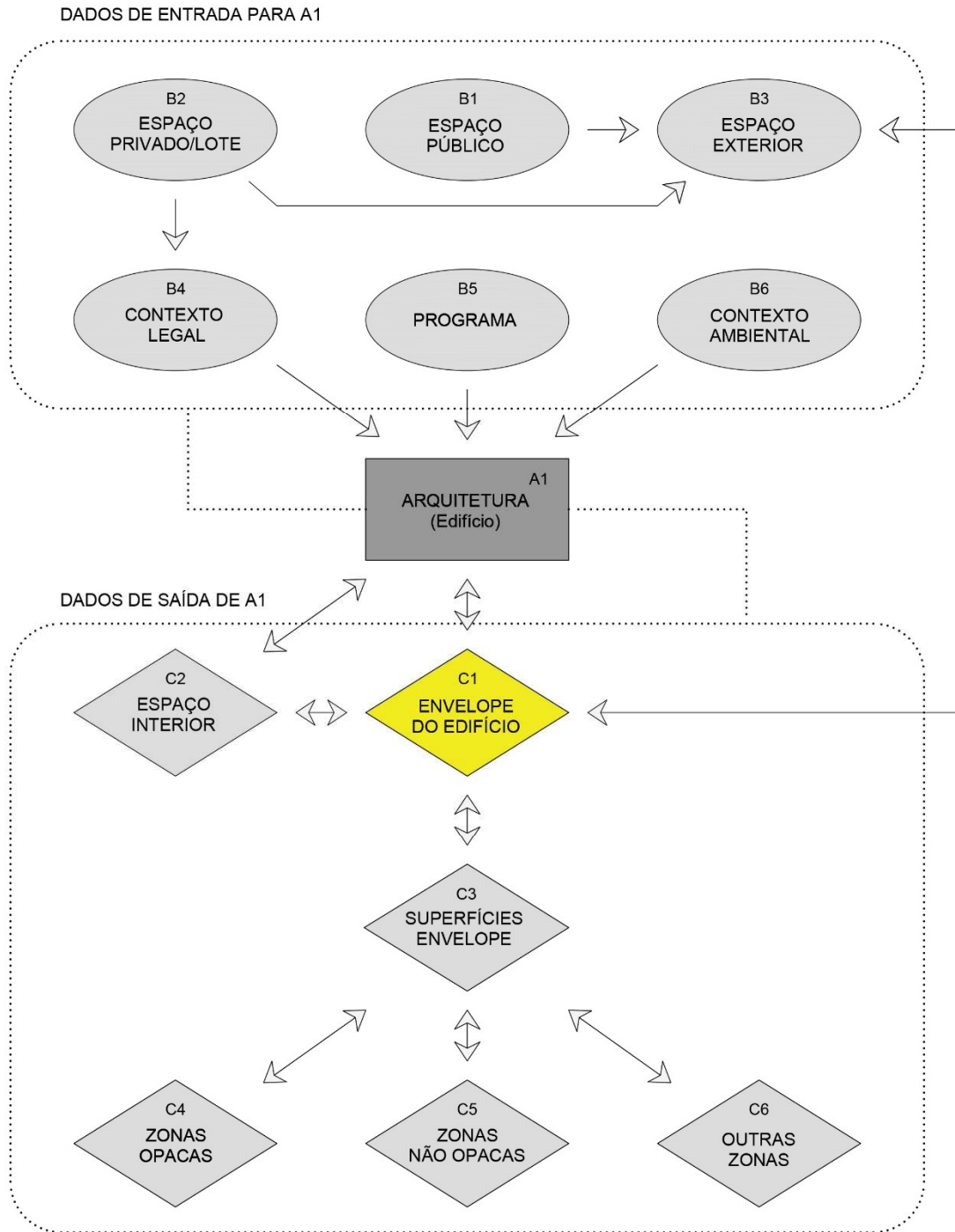


Figura 4.2: Figura ilustrativa do Sistema AE proposto, com as respectivas classes de objetos.

Para a definição dos componentes do sistema e da sua terminologia adotam-se, nesta fase inicial de definição do sistema, os conceitos e os termos provenientes das ontologias. Segundo Gruber, uma ontologia é uma especificação explícita de uma conceptualização (1993, 1). Uma ontologia consiste na especificação de uma classificação e de um vocabulário para um domínio partilhado de discurso – definições de classes, relações, funções, e de outros objetos (Gruber 1993, 1).

Sendo o domínio partilhado de discurso o domínio ou o conceito em estudo. Outra definição de ontologia é estabelecida por Beirão: ontologias são representações formais de conceitos partilhados em domínios reais ou imaginados e incluem especificações dos relacionamentos entre os conceitos (Beirão 2012, 92). Uma ontologia é composta por diferentes componentes, os quais são designados por classes de objetos: cada classe tem diferentes tipos de objetos e cada objeto tem um conjunto de parâmetros e de atributos (Beirão 2012, 92).

As ontologias são utilizadas frequentemente para suportar a partilha e a reutilização da representação formal de conhecimento e conceitos, entre sistemas de inteligência artificial (Gruber 1993, 1). Beirão utiliza uma ontologia para definir uma estrutura semântica para a geração de projetos urbanos. Neste caso, a conceptualização aborda o domínio urbano. Em ontologias formais um domínio específico pode ser descrito por classes de objetos, contendo objetos ou conceitos desse domínio, desde conceitos genéricos a conceitos específicos e incluindo uma especificação das relações entre as classes de objetos. É a hierarquia de relações entre as classes de objetos que define a semântica do domínio de conhecimento em questão. Na abordagem ao domínio urbano, as classes de objetos correspondem a representações (descrições e formas) dos componentes ou elementos do espaço urbano. As representações presentes nas classes de objetos constituem um conjunto de descrições e de formas que estão presentes em diferentes gramáticas, as quais permitem a geração dos projetos urbanos. A estrutura semântica da ontologia é portanto transferida para as gramáticas, apoiando um comportamento com mais significado no processo de geração (Beirão 2012, 48) dos projetos urbanos.

Contudo, o objetivo na presente tese, ao utilizar como referência o conceito de ontologia para a definição do Sistema Arquitetura-Envelopes de Edifícios (Sistema AE), consiste somente em estabelecer uma conceptualização formal, estabelecendo as classes de objetos do sistema e as relações entre as mesmas. Não se pretende, pelo menos nesta fase de investigação, conferir uma estrutura semântica para o projeto de arquitetura e para o projeto digital de envelopes de edifícios. Pretende-se, isso sim, determinar uma relação entre a atividade, de

âmbito mais geral, do Projeto de Arquitetura, com o seu componente, de âmbito mais específico, do Projeto Digital de Envelopes de Edifícios. Definindo-se e estabelecendo-se relações em simultâneo com outros conceitos e componentes intervenientes no projeto de arquitetura, como por exemplo o Programa do Edifício e o Projeto do Espaço Interior do Edifício. Permite-se assim que os diferentes componentes presentes no projeto de arquitetura possam ser elaborados de forma autónoma, mas permanecendo interligados e relacionados entre si. Deste modo, as características que são definidas em cada componente informam e condicionam as características dos componentes que com ele se relacionam.

A Figura 4.2 ilustra as diferentes classes de objetos estabelecidas para o sistema pretendido e as respetivas relações entre as mesmas. Estabeleceram-se três níveis hierárquicos para as classes de objetos definidas. A classe de objetos A é a que se situa a um nível hierárquico superior e define os objetos que pertencem ao domínio da disciplina da Arquitetura (A1). A classe de objetos B refere-se a objetos que servem de informação e de dados para a formação dos objetos de classe A. Quanto à classe de objetos C, consiste em uma subclasse da classe de objetos A. Os objetos pertencentes à classe C são o resultado de processos formativos que ocorrem na classe de objetos A. Contudo, as classes de objetos C podem ser formadas e transformadas de modo independente, alterando em simultâneo outros objetos, sejam eles de classe A, B ou C. A classe de objetos C1 (Envelope do Edifício), referente ao Projeto Digital de Envelopes de Edifícios, constitui um exemplo disso mesmo. Os objetos desta classe poderão ser o resultado dos processos de formação da classe de objetos A1 (Arquitetura), mas poderão ser igualmente projetados e formados de modo independente, servindo desse modo como dados para a formação dos outros objetos da classe A1, bem como para os objetos das classes B3 (Espaço Exterior), C2 (Espaço Interior) e C3 (Superfícies do Envelope).

Descrevem-se de seguida, de um modo sintético, as diferentes classes de objetos definidas. Indicam-se também exemplos de possíveis objetos que possam integrar tais classes de objetos:

**A1 – Arquitetura:**

Classe de objetos referentes à arquitetura de edifícios. Tratam-se de objetos que representam aspetos materiais ou imateriais da arquitetura de um edifício. Exemplos de possíveis objetos: espaço interior do edifício, envelope do edifício, espaços de circulação comum do edifício, materiais de construção do edifício, desempenho energético do edifício, outros.

**B1 – Espaço Público:**

Classe de objetos referentes ao espaço público em meio urbano. Integra objetos que representam aspetos materiais ou imateriais do espaço público. Exemplos de possíveis objetos: ruas, jardins, praças, mobiliário urbano, materiais de construção, desempenho ambiental (irradiação solar incidente, temperatura), outros.

**B2 – Espaço Privado/Lotes:**

Classe de objetos referentes ao espaço privado de propriedade coletiva ou individual em meio urbano. Os objetos que a compõem representam aspetos materiais ou imateriais dos lotes privados. Exemplos de possíveis objetos: lotes de terreno para construção, zonas possíveis para implantação de edifícios, zonas de logradouros, outros.

**B3 – Espaço Exterior:**

Classe de objetos referentes ao espaço exterior ao edificado. Inclui o espaço público e o espaço privado ao ar livre, sendo importante em aspetos como o índice de permeabilidade em meio urbano. Os seus objetos representam aspetos materiais ou imateriais do espaço exterior. Exemplos de possíveis objetos: praças, jardins, logradouros, saguões, espaços permeáveis, outros.

**B4 – Contexto Legal:**

Classe de objetos referentes às normas legais que regulamentam a conceção e a operação de edifícios. Provêm de regulamentos como os Planos Diretores Municipais, os Planos de Pormenor e o RGEU (Regulamento Geral das Edificações Urbanas). Exemplos de possíveis objetos: áreas brutas de construção máxima, alturas máximas de edifícios, áreas úteis mínimas de tipologias para habitação, número máximo de pisos, outros.

**B5 – Programa:**

Classe de objetos referentes ao programa que é estabelecido para o edifício. Os programas variam consoante as tipologias (habitação, escritórios, comércio) e o solicitado pelos clientes. Exemplos de possíveis objetos: número de fogos de habitação, tipologia dos fogos, número de pisos do edifício, desempenho energético do edifício, custo económico do edifício, outros.

**B6 – Contexto Ambiental:**

Classe de objetos referentes aos indicadores ambientais do local geográfico do edifício em questão. Exemplos de possíveis objetos: iluminação, irradiação solar, temperatura, vento, índice de pluviosidade, outros.

**C1 – Envelope do Edifício:**

Classe de objetos referentes à zona do edifício que estabelece o limite entre o espaço exterior e o espaço interior do edifício. Exemplos de possíveis objetos: zonas opacas, zonas não opacas, cobertura, janelas, materiais de construção, outros.

**C2 – Espaço Interior:**

Classe de objetos referentes ao espaço interior do edifício. Inclui os espaços comuns e os espaços privados do edifício. Exemplos de possíveis objetos: fracções autónomas do edifício, espaços de circulação comum do edifício, consumo energético do edifício, equipamentos (elevadores, caldeiras, geradores), outros.

**C3 – Superfícies do Envelope:**

Classe de objetos referentes às superfícies que formam o envelope do edifício. Exemplos de possíveis objetos: zonas opacas, zonas não opacas, zonas de geração de energia, materiais de construção, outros.

**C4 – Zonas Opacas:**

Classe de objetos referentes às zonas das superfícies do envelope do edifício que são opacas à iluminação proveniente do exterior. Exemplos de possíveis objetos: paredes, coberturas, portas, materiais de construção, outros.

**C5 – Zonas Não Opacas:**

Classe de objetos referentes às zonas das superfícies do envelope do edifício que não são opacas à iluminação proveniente do exterior. Exemplos de possíveis objetos: fachadas cortina, janelas, materiais de construção, outros.

**C6 – Outras Zonas:**

Classe de objetos referentes às zonas das superfícies do envelope do edifício que não separam o exterior do interior do edifício, constituindo desse modo saliências ao envelope do edifício. Exemplos de possíveis objetos: varandas, palas, platibandas, equipamentos (painéis solares, painéis fotovoltaicos, antenas de telecomunicações), outros.

Pretende-se que o sistema Arquitetura-Envelopes de Edifícios (Sistema AE), definido para o Projeto Digital de Envelopes de Edifícios, seja aplicável a diferentes tipologias de edifícios, abrangendo diferentes programas, sejam eles programas de habitação, comércio, serviços (escritórios), uso misto (habitação com comércio e/ou com serviços), equipamentos, ou outros.

## **4.3 Metodologia**

Para a elaboração do Projeto Digital de Envelopes de Edifícios é proposta uma metodologia que estabelece os passos e as fases a seguir para a elaboração deste tipo de projeto. O que se propõe constitui um enquadramento metodológico que se pretende que seja flexível, podendo ser alvo de alterações, adaptações

ou evoluções, consoante o contexto específico de cada projeto e caso assim se justifique. O próprio projetista, uma vez conhecedor da metodologia, poderá redefini-la de acordo com as suas necessidades e consoante o seu processo criativo. São pois definidas para a metodologia proposta as seguintes fases:

- **Fase A – Definir Contexto (Contexto Legal e Contexto Ambiental), Programa e Espaço Interior do edifício:**

são recolhidas as informações e os dados relativos ao contexto do projeto do edifício, como sejam a localização geográfica, as condições ambientais, as normas legais nacionais e internacionais aplicáveis à localização do edifício e ao tipo de edifício, as funções estabelecidas para o programa do edifício, entre outros. São também definidos aspetos referentes ao espaço interior do edifício, como os espaços de circulação e os espaços de permanência, no que diz respeito às suas funções, áreas e formas, por exemplo;

- **Fase B – Definir Forma Inicial do Envelope do Edifício:**

o projetista define, na fase de conceção do edifício, de acordo com o enquadramento do projeto (Fase A) e de acordo com a sua visão arquitetónica, uma ou mais formas iniciais para o envelope do edifício;

- **Fase C – Definir Orientação do Edifício:**

é estabelecida a orientação preferencial para o edifício ao nível dos pontos cardeais (Norte, Sul, Este, Oeste), por meio da rotação da totalidade ou de parte do edifício, tendo em conta o desempenho energético obtido;

- **Fase D – Definir Forma Final do Envelope do Edifício:**

através de regras de formação e transformação, o projetista desenvolve a forma inicial do envelope do edifício, fazendo-a evoluir de acordo com o desempenho energético obtido e de acordo com as suas intenções estéticas e visão arquitetónica;

- **Fase E – Definir Zonas Opacas, Zonas Não Opacas e Outras Zonas:**

são determinadas as zonas do envelope que são permeáveis à passagem da iluminação natural para o interior do edifício, tendo em consideração os

objetivos de iluminação e os objetivos de desempenho energético no interior do edifício. São também definidas, na categoria “Outras Zonas”, as zonas e elementos salientes ao envelope do edifício, como sejam as varandas, as palas, as platibandas, entre outros;

• **Fase F – Definir Zonas de Geração de Energia:**

são estabelecidas as zonas do envelope do edifício responsáveis pela transformação da energia solar em energia elétrica, por meio de tecnologias como a fotovoltaica;

• **Fase G – Definir Estrutura e Materiais de Construção:**

são definidas a estrutura do edifício e os materiais de construção a aplicar nas diferentes zonas do envelope do edifício.

As fases da metodologia proposta ocorrem normalmente na sequência ABCDEFG, mas após definidas as fases A e B, as fases C, D, E, F e G podem ocorrer em diferentes sequências, de acordo com as intenções do projetista. A informação e os dados das fases estabelecidas são alocados em diferentes classes de objetos do Sistema Arquitetura-Envelopes de Edifícios (Sistema AE) proposto.

		CLASSES DE OBJETOS									
		A1 Arquitetura	C1 Envelope do Edifício	C3 Superfícies do Envelope	C4 Zonas Opacas	C5 Zonas Não Opacas	C6 Outras Zonas	B6 Contexto Ambiental	B4 Contexto Legal	B5 Programa	C2 Espaço Interior
FASES	A Definir Contexto, Programa e Espaço Interior	X						X	X	X	X
	B Definir Forma Inicial do Envelope		X	X							
	C Definir Orientação do Edifício		X	X							
	D Definir Forma Final do Envelope		X	X							
	E Definir Zonas Opacas, Não Opacas e Outras				X	X	X				
	F Definir Zonas de Geração de Energia		X	X	X	X	X				
	G Definir Estrutura e Materiais de Construção				X	X	X				

Figura 4.3: Correspondência entre as fases da metodologia proposta para o Projeto Digital de Envelopes de Edifícios e as classes de objetos do sistema AE, onde são alocadas as informações e os dados definidos nas diferentes fases.

A Figura 4.3 indica a relação entre as fases da metodologia proposta para o Projeto Digital de Envelopes de Edifícios e as classes de objetos do sistema AE.

Importa ainda referir que as fases da metodologia proposta para o Projeto Digital de Envelopes de Edifícios procuram integrar as metodologias de projeto tradicionais dos arquitetos. Um exemplo das metodologias de projeto tradicionais é indicado por Merritt and Ricketts ( [1958] 2000, 1.5) ( [1958] 2000, 2.10), que referem a existência de uma fase de definição do programa, de uma fase de projeto conceptual, e de uma fase de desenvolvimento de projeto, para o projeto de um edifício. Encontra-se também por eles referida a necessidade de atender aos regulamentos legais, os quais fornecem orientações e restrições para o projeto dos edifícios (Merritt and Ricketts [1958] 2000, 1.36). A coleta e organização da informação relativa a tais regulamentos legais deve ocorrer antes da fase de projeto conceptual. Pode ocorrer em simultâneo com a fase de definição do programa do edifício, por exemplo.

Assim sendo, no que diz respeito ao Projeto Digital de Envelopes de Edifícios, importa referir que a “Fase A – Definir Contexto, Programa e Espaço Interior do Edifício” assemelha-se à fase de definição do programa indicada por Merritt e Ricketts ([1958] 2000, 1.5) ([1958] 2000, 2.10), integrando também a necessidade de coleta de informação relativa a regulamentos legais ([1958] 2000, 1.36). Permite pois definir os aspetos relativos ao Programa (tipologia do edifício a projetar, desempenho energético pretendido, custo estimado de construção, entre outros), os aspetos relativos ao Contexto Legal (nomeadamente a legislação em vigor para o espaço urbano para onde se está a projetar), os aspetos relativos ao Contexto Ambiental (as condições climáticas do local de projeto), e os aspetos relativos ao Espaço Interior (características como as áreas e os pé-direitos das diferentes funções e espaços que o edifício deverá conter).

Ainda na Fase A, um exemplo de orientação e restrição para o projeto de edifícios, presente no tópico Contexto Legal, consiste no facto de que a legislação em vigor para o espaço urbano para onde se está a projetar estipula, em muitos dos casos, a obrigatoriedade de alinhamento de construções,

nomeadamente o alinhamento da fachada frontal do edifício que se está a projetar com as fachadas frontais dos edifícios confinantes. É possível constatar um exemplo desta obrigatoriedade no Ponto 2 do Artigo 42º do Regulamento do PDM de Lisboa de 2011 (Câmara Municipal de Lisboa 2011, 43), ponto esse que constitui uma das regras indicadas para a construção de edifícios em espaços urbanos centrais e residenciais. A Fase A da metodologia de projeto proposta define variáveis, pertencentes à gramática descritiva da Gramática do Envelope de Edifícios (descrita no Capítulo 5 da tese) que permitem estipular constrangimentos, tais como o alinhamento da fachada frontal do edifício que se está a projetar com as fachadas frontais dos edifícios que o rodeiam. A variável “Alinhamento com o plano marginal do edificado”, cuja designação se baseia no Ponto 2 do Artigo 42º do Regulamento do PDM de Lisboa de 2011, presente na Tabela A7.1 (ver Anexo A7.1 da tese), comprova isso mesmo. Outros alinhamentos de construções, ou mesmo com outros elementos que o projetista considere relevantes no projeto que se encontra a elaborar, podem ser efetuados através da variável com a designação “Outros constrangimentos”, a qual pode ser replicada o número de vezes que o projetista pretender, encontrando-se esta variável também presente na Tabela A7.1 do Anexo A7.1 da presente tese. Deste modo, os constrangimentos, tais como o alinhamento do edifício com as construções em seu redor, constituem elementos provenientes do contexto do projeto do edifício, que servem como premissas para a definição da forma do envelope do edifício.

A “Fase B – Definir Forma Inicial do Envelope do Edifício” da metodologia proposta para o Projeto Digital de Envelopes de Edifícios assemelha-se à fase de projeto conceptual indicada por Merritt e Ricketts ([1958] 2000, 1.5) ([1958] 2000, 2.10). Na fase de projeto conceptual, as necessidades e os constrangimentos identificados na fase anterior, a fase de definição do programa, são interpretados pelo projetista, de acordo com a sua visão arquitetónica, sendo definidos conceptualmente a organização dos espaços internos e a forma geral do envelope do edifício em projeto. Em concordância com a fase de projeto conceptual, a Fase B da metodologia proposta para o Projeto Digital de Envelopes de Edifícios permite ao projetista definir livremente uma forma inicial para o envelope do edifício, forma essa que sendo uma forma

preliminar do envelope, tem em consideração os constrangimentos que foram definidos na fase anterior, a “Fase A – Definir Contexto, Programa e Espaço Interior do Edifício”, constrangimentos esses que incluem no caso do Projeto Digital de Envelopes de Edifícios, a organização formal do espaço interior do edifício em projeto. Assim, a Fase B permite ao projetista estabelecer as intenções arquitetônicas e outros constrangimentos que pretenda, para além dos definidos na Fase A, para a definição da forma inicial do envelope do edifício. Tais intenções arquitetônicas e constrangimentos podem consistir em alinhamentos do edifício em projeto com construções e/ou com outros elementos naturais e artificiais presentes no local para onde o edifício se encontra a ser projetado. O projetista poderá ter em conta também eventuais vistas que se pretendam proporcionar a partir do edifício projetado, definindo-se desse modo a forma inicial do envelope do edifício de modo a que esteja orientada na direção ou direções apropriadas para permitir as vistas pretendidas. Outro fator que pode ser considerado na definição da forma inicial do envelope é que esta seja desenhada ou modelada de modo a proporcionar o aproveitamento de parte do lote em questão para jardim e/ou logradouro. Quaisquer outros fatores que o projetista entenda considerar como pertinentes para a elaboração da forma arquitetônica do envelope do edifício que está a projetar, podem de igual modo ser contemplados no desenho ou modelação da forma inicial do envelope, na “Fase B – Definir Forma Inicial do Envelope do Edifício”. É assim assegurada a possibilidade de utilização das metodologias de projeto tradicionais dos arquitetos, para a definição da forma inicial do envelope do edifício que está a ser projetado.

A “Fase C – Definir Orientação do Edifício”, a “Fase D – Definir Forma Final do Envelope do Edifício”, a “Fase E – Definir Zonas Opacas, Zonas Não Opacas e Outras Zonas”, a “Fase F – Definir Zonas de Geração de Energia” e a “Fase G – Definir Estrutura e Materiais de Construção”, constituem fases da metodologia proposta para o Projeto Digital de Envelopes de Edifícios que se assemelham à fase de desenvolvimento de projeto indicada por Merritt e Ricketts ([1958] 2000, 1.5) ([1958] 2000, 2.11). A fase de desenvolvimento de projeto é a fase que define com rigor a forma, a estrutura e os materiais de construção do edifício, permitindo a elaboração de um conjunto de informação que serve de base para

a construção do edifício. Em concordância com a fase de desenvolvimento de projeto, as Fases C, D, E e F da metodologia proposta para o Projeto Digital de Envelopes de Edifícios permitem definir os aspetos relativos à forma do envelope do edifício em projeto, enquanto que a Fase G permite definir os aspetos relacionados com a estrutura e os materiais de construção, incluindo os elementos (como painéis) fotovoltaicos, que permitem construir a forma projetada para o envelope do edifício em projeto. Como tal, também as Fases C, D, E, F e G da metodologia proposta para o Projeto Digital de Envelopes de Edifícios permitem a utilização das metodologias de projeto tradicionais, ou seja, as metodologias de projeto que são habitualmente utilizadas pelos arquitetos.

Deve também ser referido que a metodologia proposta para o Projeto Digital de Envelopes de Edifícios é uma metodologia de âmbito específico. Relaciona-se com a metodologia de âmbito mais geral, estabelecida para o modelo tipo BEM (Building Energy Modeling), a qual se encontra apresentada no subcapítulo 3.4 (Proposta de um modelo tipo BEM como suporte para o projeto de arquitetura de edifícios) da presente tese.

A metodologia para o modelo tipo BEM é uma metodologia que pretende servir de referência para a elaboração de software que suporte a realização do projeto de arquitetura de edifícios, permitindo assim o projeto de arquitetura de edifícios com um eficiente desempenho energético. Assim, o modelo BEM possibilita o projeto de arquitetura de edifícios de acordo com a lógica e o paradigma do Projeto baseado em Energia, proposto pela presente tese. A metodologia proposta para o modelo BEM estabelece um conjunto de fases que ocorrem durante o processo de elaboração de um projeto de arquitetura de edifícios, através da utilização de um software com o modelo BEM.

A metodologia específica proposta para o Projeto Digital de Envelopes de Edifícios articula-se com a metodologia de âmbito geral estabelecida para o modelo tipo BEM da forma ilustrada na Figura 4.4.

<b>Modelo tipo BEM</b>		<b>Projeto Digital de Envelopes de Edifícios</b>
FASE 1: Programa e Contexto	←	FASE A: Definir Contexto, Programa e Espaço Interior do Edifício
FASE 2: Forma Inicial do Edifício	←	FASE B: Definir Forma Inicial do Envelope do Edifício
FASE 3: Análise Energética		FASE C: Definir Orientação do Edifício
FASE 4: Avaliação da Solução Formal		FASE D: Definir Forma Final do Envelope do Edifício
FASE 5: Forma Final do Edifício		
FASE 6: Transformação da Forma	←	FASE E: Definir Zonas Opacas, Zonas Não Opacas e Outras Zonas
FASE 7: Incorporação dos Elementos Construtivos		FASE F: Definir Zonas de Geração de Energia
FASE 8: Avaliação da Solução Construtiva		FASE G: Definir Estrutura e Materiais de Construção
FASE 9: Elaboração da Informação Técnica		
FASE 10: Ficheiro IFC		

Figura 4.4: Articulação entre as fases propostas para o modelo tipo BEM e as fases propostas para o Projeto Digital de Envelopes de Edifícios.

Assim, a FASE A, do Projeto Digital de Envelopes de Edifícios, pode ocorrer dentro do âmbito da FASE 1 do Modelo tipo BEM. As Fases A e 1 podem ser utilizadas de acordo com as metodologias de projeto tradicionais dos arquitetos, assemelhando-se à fase de definição do programa. A FASE B, do Projeto Digital de Envelopes de Edifícios, pode ocorrer dentro do âmbito da FASE 2 do Modelo BEM. As Fases B e 2 também podem ser utilizadas de acordo com as metodologias de projeto tradicionais dos arquitetos, assemelhando-se à fase de projeto conceptual.

O conjunto composto pela FASE C, FASE D, FASE E, FASE F e FASE G, do Projeto Digital de Envelopes de Edifícios, pode ocorrer dentro do âmbito do conjunto composto pela FASE 3, FASE 4, FASE 5, FASE 6, FASE 7 e FASE 8 do Modelo BEM. Mais especificamente, a FASE C, a FASE D, a FASE E e a FASE F constituem um subconjunto que permitem definir a forma do envelope de um edifício. Após a execução destas fases, no âmbito do Projeto Digital de Envelopes de Edifícios, pode ocorrer a execução do conjunto composto pela FASE 3, FASE 4, FASE 5 e FASE 6, relativo ao modelo BEM e ao projeto de arquitetura de um edifício no seu todo. A FASE G permite definir a estrutura e os materiais de construção, incluindo os materiais fotovoltaicos, a aplicar no envelope do edifício. Após a execução dessa fase no Projeto Digital de Envelopes de Edifícios, pode ocorrer o subconjunto composto pela FASE 7 e pela FASE 8, relativo ao modelo BEM e ao projeto de arquitetura no seu todo. Este conjunto de fases pode igualmente ser utilizado de acordo com as metodologias de projeto tradicionais dos arquitetos, assemelhando-se à fase de desenvolvimento de projeto.

A FASE 9 e a FASE 10 dizem respeito apenas ao modelo BEM, não tendo uma relação direta com qualquer fase do Projeto Digital de Envelopes de Edifícios. A FASE 9 permite a elaboração das peças desenhadas habitualmente utilizadas para a descrição da informação técnica de um projeto de arquitetura, nomeadamente as plantas, cortes, alçados e perspetivas 3D. Por último, a FASE 10 permite a realização de um Ficheiro IFC (Industry Foundation Classes), o qual consiste num formato de ficheiro que possibilita a partilha de informação do projeto entre os diferentes setores profissionais que nele intervêm, nomeadamente a arquitetura, a engenharia e a construção.

Refira-se ainda que as fases das metodologias para o Projeto Digital de Envelopes de Edifícios e para o modelo tipo BEM pretendem abranger também as etapas habituais de um projeto de arquitetura em Portugal, nomeadamente o Estudo Prévio, o Licenciamento do Projeto e o Projeto de Execução. A definição, durante o projeto de um edifício, das Fases A a F do Projeto Digital de Envelopes de Edifícios e a definição das Fases 1 a 6 do modelo BEM permitem abranger a etapa de Estudo Prévio, definindo o programa, a forma e a organização espacial

do edifício. A definição das Fases A a G do Projeto Digital de Envelopes de Edifícios e a definição das Fases 1 a 10 do modelo BEM permitem a realização da etapa do Licenciamento do Projeto, definindo para além do programa, da forma e da organização espacial do edifício, também a estrutura e os materiais de construção, incluindo os materiais fotovoltaicos, do edifício. A maior pormenorização e o detalhe dos aspetos construtivos definidos na Fase G do Projeto Digital de Envelopes de Edifícios e na Fase 7 do modelo BEM permite também a realização da etapa do Projeto de Execução de um edifício.

## 4.4 Instrumentos

O modo de operacionalizar, ou seja, o modo de pôr em prática a metodologia proposta para o Projeto Digital de Envelopes de Edifícios, consiste em recorrer a dois instrumentos conceptuais que executam essa mesma metodologia no sistema Arquitetura-Envelopes de Edifícios (AE) definido. Optou-se por utilizar como instrumentos conceptuais um algoritmo de forma e uma gramática genérica discursiva. O algoritmo de forma consiste em um conceito teórico, desenvolvido pelo autor da tese, que se baseia nos conceitos de gramática discursiva, desenvolvido por Duarte (2001, 25), e de gramática genérica, desenvolvido por Beirão (2012, 225).

Uma gramática discursiva é uma gramática que utiliza gramáticas de forma e gramáticas descritivas. As gramáticas de forma são gramáticas que lidam com aspetos formais e consistem em definições de forma, estabelecendo uma sintaxe composta por formas. As gramáticas descritivas lidam com semântica e consistem em descrições simbólicas de outros aspetos relevantes dos projectos ou do seu contexto, para além da forma (Duarte 2001, 25).

Pela sua definição, uma gramática de forma é um instrumento que define um conjunto de formas denominado de linguagem (Stiny 1980, 347). As formas da linguagem são geradas a partir de uma forma inicial que pertence também à linguagem, e por um conjunto de regras de transformação de forma que se aplicam à forma inicial e às restantes formas da linguagem. Assim, é possível

gerar diversas formas, todas elas diferentes mas todas elas pertencentes à mesma linguagem, gramática, ou sintaxe.

Já uma gramática descritiva consiste num conceito desenvolvido por Stiny (1981, 257) com o objetivo de descrever características de projeto não abrangidas pelas gramáticas de forma. Uma gramática de forma especifica as formas dos projetos. Uma gramática descritiva descreve o projeto em termos de outras características consideradas relevantes. A relação entre gramáticas de forma e gramáticas descritivas é tal que, para cada regra de forma, existe uma ou mais regras descritivas correspondentes, para além de uma descrição inicial correspondente à forma inicial. Tal como as regras formais são aplicadas ao projeto em evolução, as regras descritivas correspondentes são aplicadas à descrição em evolução. Assim, à medida que evolui a geração do projeto, é construída a descrição do mesmo (Duarte 2001, 25).

Uma gramática discursiva, através da utilização de gramáticas de forma e de gramáticas descritivas, constitui um conjunto de gramáticas paralelas. Gramáticas paralelas são gramáticas que permitem separar diferentes representações ou aspetos do projeto em diferentes computações que interagem entre si. Esta separação facilita a manipulação de problemas complexos de projeto, decompondo-os em problemas menores. As representações podem ser formais e visuais (planta, corte, alçado, entre outros) ou simbólicas (desempenho térmico, número de quartos, entre outros) (Duarte 2001, 66).

A gramática discursiva composta por diferentes gramáticas paralelas constitui um modelo de gramáticas já utilizado anteriormente em situações de projeto. Duarte (2001, 66) criou e utilizou esse modelo para abordar e resolver diferentes aspetos do projeto de habitações personalizadas de modo separado. Por exemplo, podem ser gerados diferentes pisos numa habitação numa gramática de forma, a qual interage com uma outra gramática descritiva que é a do programa habitacional. Alterando o programa habitacional na gramática descritiva, diferentes pisos são gerados automaticamente na gramática de forma. Beirão (2012, 83), para a elaboração de um instrumento para a geração de projetos urbanos, criou e utilizou também gramáticas discursivas compostas

por gramáticas paralelas para desenvolver algoritmos, aos quais chamou de “Padrões de Indução Urbana”. Os padrões de indução urbana permitem replicar os atos de projeto típicos dos projetistas urbanos, tal como o desenho de eixos de composição e o desenho de perfis de arruamentos, os quais são utilizados pela maioria dos projetistas urbanos. É através da combinação progressiva de diferentes padrões de indução urbana, definidos em diferentes gramáticas discursivas, que são gerados os projetos urbanos.

Quanto à gramática genérica, esta consiste em uma gramática que define uma linguagem de meta-design, a qual pode ser aplicada genericamente em um domínio de projeto ou design, independentemente das especificações locais ou idiossincrasias particulares de uma linguagem específica de projeto ou design (Beirão 2012, 225). Assim, através de uma gramática genérica, podem ser geradas diferentes gramáticas específicas. O processo de geração de uma gramática específica, por meio de uma gramática genérica, depende do contexto em que a gramática genérica é aplicada e das decisões de projeto que são tomadas na gramática genérica ou pelo projetista, ou pelo computador, ou por ambos. Uma gramática genérica é também formada por uma ou mais gramáticas discursivas e por uma ontologia que estabelece as relações entre os objetos criados pelas gramáticas discursivas.

O conceito teórico de algoritmo de forma, proposto pelo autor da presente tese, evolui e desenvolve os conceitos de gramática discursiva e de gramática genérica, na medida em que em teoria permite gerar qualquer forma, sendo como tal “universal”. O termo “universal” é utilizado entre aspas na medida em que se pretende que um algoritmo de forma seja o mais “universal” possível, mas ainda não está provado que o seja, de facto. Devido à pretensão de “universalidade”, o termo algoritmo de forma pode também ser designado de gramática “universal”.

Passando a explicar o conceito teórico de algoritmo de forma: no que diz respeito ao conceito de gramática discursiva, este define uma linguagem específica de formas (uma gramática específica), formas essas que são concretas e são definidas pelas gramáticas de forma paralelas que compõem a gramática

discursiva em causa. Já o conceito de gramática genérica define formas mais abstratas em diferentes gramáticas discursivas que pretendem replicar ações típicas de projeto (como por exemplo o desenho de linhas de eixos viários), as quais permitem gerar diversas gramáticas específicas e formas concretas (como por exemplo as formas para os perfis dos arruamentos), consoante o contexto do projeto e as decisões do projetista. O conceito de algoritmo de forma, ou gramática “universal” (Figura 4.5), pretende atingir um maior grau de abstração, ao não definir em concreto qualquer forma para uma linguagem, mas definindo sim em abstrato os procedimentos e as regras para o estabelecimento das formas para uma linguagem. Uma gramática discursiva e uma gramática genérica contêm já na sua definição uma forma inicial fixa, a qual depois é transformada pelas regras da respetiva gramática. Um algoritmo de forma pode conter diferentes formas iniciais (em teoria, qualquer forma inicial), às quais as mesmas regras do algoritmo se podem aplicar de modo semelhante.

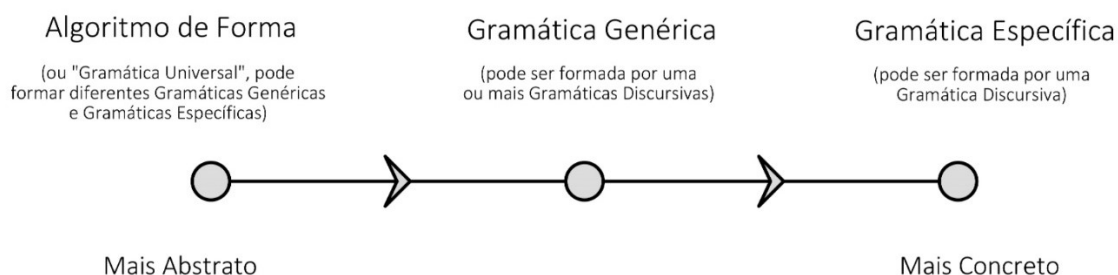


Figura 4.5: Figura ilustrativa da relação entre Algoritmo de Forma (ou “Gramática Universal”), Gramática Genérica, Gramática Específica e Gramática Discursiva.

Desse modo, um algoritmo de forma permite estabelecer e gerar diferentes gramáticas genéricas, as quais podem ser formadas por diferentes gramáticas discursivas, consoante as formas iniciais estabelecidas pelo projetista e consoante o contexto do projeto, no caso do Projeto Digital de Envelopes de Edifícios, o contexto ambiental, o contexto legal, o programa e o espaço interior estabelecidos para o projeto do envelope em causa.

O facto de não se definir nenhuma forma inicial na definição de um algoritmo de forma é útil na medida em que para além de permitir gerar qualquer forma para

o envelope de edifícios, permite também operar sobre qualquer forma de um envelope de edifício já existente, de modo a que estes obtenham um desempenho energético eficiente. Assim, torna-se possível utilizar o conceito de algoritmo de forma para a criação de envelopes de edifícios de raiz, mas também para a reabilitação de envelopes de edifícios já existentes, onde a sua forma geral já se encontra previamente definida.

Na presente tese, para uma demonstração mais simples e prática do conceito de algoritmo de forma utilizou-se um caso específico concreto, em que uma forma paramétrica inicial para o envelope de edifícios é definida, o que permite constituir desse modo uma gramática genérica para o envelope de edifícios. Apesar de ser uma gramática genérica, o tipo de regras que contém podem ser aplicadas de modo semelhante a outras formas iniciais que sejam estabelecidas para o envelope de edifícios. Daí a possibilidade de essas regras poderem integrar a constituição de um algoritmo de forma, podendo ser aplicadas a qualquer forma e podendo gerar também qualquer forma. Em investigação futura pretende-se desenvolver o formalismo de um algoritmo de forma, demonstrando-o na constituição da gramática discursiva, das gramáticas de forma e da gramática descritiva que o compõem.

A gramática genérica desenvolvida para o Projeto Digital de Envelopes de Edifícios é uma gramática genérica discursiva (utiliza a estrutura de uma gramática discursiva) e é designada por Gramática de Envelopes de Edifícios. É composta por diferentes gramáticas paralelas, as quais funcionam complementarmente entre si num processo sequencial, ou seja, que ocorre em diferentes fases (conforme descrito no subcapítulo anterior, “Metodologia”). No total, são utilizadas seis gramáticas, cinco gramáticas de forma e uma gramática descritiva. A gramática descritiva serve como orientadora para o processo de geração de forma pelas gramáticas de forma, fornecendo constrangimentos legais, indicadores para o desempenho energético e informações referentes ao programa e ao espaço interior do edifício.

A Gramática de Envelopes de Edifícios é também designada por Gramática A. As gramáticas de forma que a compõem seguem a definição de gramática de

forma elaborada por Stiny (1971, 128), compondo um tuplo  $\{ I, R, V_T, V_M \}$ , em que I refere-se a uma forma inicial, R a um conjunto de regras de transformação de forma,  $V_T$  a um conjunto de formas que formam a linguagem e  $V_M$  a um conjunto de símbolos que servem de rótulos para a aplicação das regras de transformação. A gramática descritiva corresponde à definição de gramáticas descritivas criada por Stiny (1981, 257), formando um conjunto  $\{ \# a_n \# \}$  em que a letra “a” corresponde a uma descrição de uma ou mais formas das gramáticas de forma e “n” consiste no número de descrições existentes na gramática descritiva.

A Gramática de Envelopes de Edifícios A é pois composta pelas seguintes gramáticas:

• **Gramática de forma L:  $\{ I, R, V_T, V_M \}$  do Lote Urbano:**

refere-se à forma do lote urbano destinado para o projeto do edifício em causa. O conjunto de formas  $V_T$  da gramática constitui uma álgebra  $U_{23}$ , significando o primeiro número do índice, 2, que as formas que compõem o conjunto podem ser no máximo bidimensionais, ou seja, pontos, linhas ou superfícies, e o segundo número, 3, que essas formas se posicionam no espaço tridimensional, incluindo quaisquer espaços adimensionais, unidimensionais e bidimensionais. O conjunto de símbolos  $V_M$  constitui uma álgebra  $V_{03}$ , significando o primeiro número do índice, 0, que as formas dos símbolos são pontos (adimensionais), e o segundo número, 3, que essas formas se posicionam no espaço tridimensional ;

• **Gramática de forma E:  $\{ I, R, V_T, V_M \}$  do Envelope do Edifício:**

diz respeito à forma do envelope do edifício. O conjunto de formas  $V_T$  constitui uma álgebra  $U_{33}$ , significando o primeiro número do índice, 3, que as formas que compõem o conjunto podem ser pontos, linhas, superfícies ou volumes, e o segundo número, também 3, que essas formas se posicionam no espaço tridimensional. O conjunto de símbolos  $V_M$  constitui uma álgebra  $V_{03}$ , significando o primeiro número 0 que as formas dos símbolos são pontos, e o segundo número 3 que essas formas se posicionam no espaço tridimensional;

• **Gramática de forma T: { I, R ,  $V_T$  ,  $V_M$  } das Superfícies do Envelope:**

define as superfícies que formam o envelope do edifício. O conjunto de formas  $V_T$  constitui uma álgebra  $U_{23}$  e o conjunto de símbolos  $V_M$  uma álgebra  $V_{03}$ ;

• **Gramática de forma F: { I, R ,  $V_T$  ,  $V_M$  } dos Elementos Fotovoltaicos do Envelope:**

refere-se aos elementos fotovoltaicos projetados para o envelope do edifício. O conjunto de formas  $V_T$  constitui uma álgebra  $U_{23}$  e o conjunto de símbolos  $V_M$  uma álgebra  $V_{03}$ ;

• **Gramática de forma M: { I, R ,  $V_T$  ,  $V_M$  } dos Operadores:**

possibilita que a gramática do envelope dos edifícios e que o conceito de algoritmo de forma sejam “universais”, podendo-se utilizar qualquer forma inicial e podendo-se de igual modo gerar qualquer tipo de forma, através da aplicação das regras de transformação da gramática. É constituída pelos elementos formais que permitem essa capacidade. O conjunto de formas  $V_T$  constitui uma álgebra  $U_{13}$  e o conjunto de símbolos  $V_M$  uma álgebra  $V_{03}$ ;

• **Gramática descritiva D: { #  $a_n$  # } do Contexto, do Programa e do Espaço Interior:**

define os elementos simbólicos, em número, texto e forma, que orientam o desenho do envelope do edifício, tais como a informação e os dados provenientes do contexto ambiental, do contexto legal, do programa e do espaço interior do edifício. Tais elementos simbólicos são descritos no formato #  $a_1$  #  $a_2$  #  $a_3$  #  $a_n$  # , em que a letra “a” corresponde a cada um dos elementos descritos e “n” consiste no número de elementos da descrição.

As diferentes gramáticas da gramática do envelope de edifícios intervêm em diferentes fases da metodologia estabelecida para o Projeto Digital de Envelopes de Edifícios, definindo os dados necessários nas diferentes classes de objetos do sistema Arquitetura-Envelopes de Edifícios (AE), nomeadamente na classe de objetos Envelope do Edifício (C1) e nas classes de objetos com ela

diretamente relacionadas: Arquitetura (A1), Espaço Exterior (B3), Espaço Interior (C2), Superfícies Envelope (C3), Zonas Opacas (C4), Zonas Não Opacas (C5) e Outras Zonas (C6). A gramática descritiva D assume particular importância na medida em que descreve as características que orientam a geração da forma do envelope do edifício nas diferentes gramáticas de forma. As características descritas referem-se ao conteúdo definido em diferentes classes de objetos do sistema Arquitetura-Envelopes de Edifícios (sistema AE), sendo essas características as seguintes:

#### 1 – O Contexto Ambiental do edifício (classe de objetos B6)

Exemplos de Parâmetros:

- Irradiação Incidente
- Temperatura
- Iluminação
- Nível Sonoro
- Outros

#### 2 – O Contexto Legal do edifício (classe de objetos B4)

Exemplos de Parâmetros:

- Área de Implantação Máxima
- Área Bruta de Construção Máxima
- Altura Máxima
- Número Máximo de Pisos
- Outros

#### 3 – O Programa do edifício (classe de objetos B5)

Exemplos de Parâmetros:

- Tipologia do edifício

Exemplos de Atributos:

- Tipologia das fracções
- Funções das fracções
- Áreas
- Custo Económico
- Desempenho Energético
- Outros

#### 4 – O Espaço Interior do edifício (classe de objetos C2)

Exemplos de Parâmetros:

- Espaços de Circulação

Exemplos de Atributos:

- Área
- Volume
- Forma

- Número de Pisos
  - Outros
- Espaços de Permanência
- Exemplos de Atributos:
- Funções
  - Áreas
  - Volumes
  - Formas
  - Número de Pisos
  - Outros

As características referentes ao Espaço Interior permitem definir de um modo mais direto os aspetos formais do interior do edifício, podendo inclusive conter formas geradas através de gramáticas de forma elaboradas com essa finalidade, como as desenvolvidas por Duarte em “Customizing Mass Housing: A Discursive Grammar for Siza’s Malagueira Houses” (2001, 66). A Figura 4.6 ilustra a relação entre as diferentes gramáticas da gramática do envelope de edifícios e as fases da metodologia para o projeto digital de envelopes de edifícios.

		FASES						
		A Definir Contexto, Programa e Espaço Interior	B Definir Forma Inicial do Envelope	C Definir Orientação do Edifício	D Definir Forma Final do Envelope	E Definir Zonas Opacas, Não Opacas e Outras	F Definir Zonas de Geração de Energia	G Definir Estrutura e Materiais de Construção
GRAMÁTICAS	Gramática do Envelope de Edifícios A: { $U_{13} V_{13}$ }	X	X	X	X	X	X	X
	Gramática de Forma do Lote Urbano L: { $U_{13} V_{13}$ }		X					
	Gramática de Forma do Envelope do Edifício E: { $U_{13} V_{13}$ }		X	X	X	X	X	X
	Gramática de Forma das Superfícies T: { $U_{13} V_{13}$ }				X	X	X	X
	Gramática de Forma dos Elementos Fotovoltaicos F: { $U_{13} V_{13}$ }				X		X	
	Gramática de Forma dos Operadores M: { $U_{13} V_{13}$ }		X	X	X	X	X	X
	Gramática Descritiva do Contexto, Programa e Espaço Interior D: { $a_i, \#$ }	X	X	X	X	X	X	X

Figura 4.6: Relação entre as gramáticas da Gramática do Envelope de Edifícios e as fases da metodologia do Projeto Digital de Envelopes de Edifícios.

Constata-se que a gramática descritiva D percorre todas as fases da metodologia, descrevendo as características que orientam a geração das formas

nas diferentes gramáticas de forma. Quanto às gramáticas de forma, estas ocorrem em fases específicas da metodologia, merecendo especial destaque a Gramática de Forma do Envelope do Edifício E, que por ser de âmbito geral ocorre em todas as fases de definição de forma, e a Gramática de Forma dos Operadores M, que por permitir gerar diversas linguagens e sintaxes de forma, possibilita o facto de que a Gramática de Envelopes de Edifícios e que o conceito de Algoritmo de Forma sejam “universais”, podendo adotar quaisquer formas iniciais para as suas gramáticas de forma e podendo igualmente gerar quaisquer tipos de formas para o envelope do edifício. Por isso mesmo, a Gramática dos Operadores M também intervém em todas as fases de definição de forma da metodologia para o projeto digital de envelopes de edifícios. A definição completa da Gramática do Envelope de Edifícios, em conjunto com exemplos da sua aplicação, são apresentados no capítulo seguinte, o Capítulo 5.

## 4.5 Síntese do Capítulo

O presente capítulo define o Projeto Digital de Envelopes de Edifícios como um caso de estudo específico do Projeto baseado em Energia. Pretende testar a hipótese sugerida pela investigação, a de desenvolver um sistema de projeto que se baseie em desempenho energético, permitindo criar e transformar formas para o envelope de edifícios que tenham um eficiente desempenho energético, ou seja, que sejam capazes de produzir no mínimo a energia elétrica que os edifícios consomem.

Apresenta como contributos para o conhecimento e para a prática da Arquitetura os seguintes aspetos:

- A sugestão de um campo de atuação e de um Âmbito para o Projeto Digital de Envelopes de Edifícios, justificável na medida em que:

- 1 – Os edifícios são responsáveis por 36% do consumo energético em todo o mundo (United Nations Environment and International Energy Agency 2017, 14), sendo o envelope a zona com maior impacto no consumo energético dos edifícios;

2 – Através da análise dos dados fornecidos por Ritchie e Roser (2019), é possível verificar que a nível mundial a aposta nas energias renováveis endógenas, como a energia solar, é crescente. Como tal, faz sentido projetar, construir e reabilitar o envelope dos edifícios de modo a torná-los mais eficientes não apenas no que se refere ao consumo energético, mas também no que diz respeito à geração de energia elétrica;

3 – Por ser necessário para o projeto do envelope dos edifícios a utilização da trajetória solar, o cálculo da energia solar incidente, o cálculo do consumo de energia no edifício e a geração e transformação da geometria do envelope, características que envolvem computações com alguma complexidade, é útil o recurso a meios digitais para este tipo de projeto. Daí a sua designação por Projeto Digital de Envelopes de Edifícios.

- A definição de um Sistema Arquitetura-Envelopes de Edifícios (Sistema AE) que enquadre o Projeto Digital de Envelopes de Edifícios no âmbito mais vasto da disciplina da Arquitetura, organizando e permitindo um simplificado fluxo de informação e de dados digitais entre estas duas áreas;
- A constituição de uma metodologia para o Projeto Digital de Envelopes de Edifícios, estabelecendo de um modo flexível os passos e as fases a seguir de modo a elaborar este tipo de projeto. Para concretizar a metodologia proposta para o projeto digital de envelopes de edifícios no sistema Arquitetura-Envelopes de Edifícios sugerido, são criados os seguintes instrumentos conceptuais: o conceito teórico de Algoritmo de Forma e a Gramática do Envelope de Edifícios, baseados nos conceitos de Gramática da Forma, Gramática Descritiva, Gramática Discursiva e Gramática Genérica. O conceito de algoritmo de forma permite projetar qualquer forma para o envelope de um edifício, de modo a torná-lo eficiente no seu desempenho energético, tendo em consideração o contexto ambiental, o contexto legal, o programa e o espaço interior do edifício. A gramática do envelope de edifícios constitui um caso específico de um algoritmo de forma, formando uma gramática genérica discursiva, a qual permite a geração de diferentes gramáticas específicas e de diferentes formas específicas para o envelope de edifícios, todas elas provenientes de uma mesma forma paramétrica inicial.

## 4.6 Referências do Capítulo 4

**Beirão, José.** 2012. “City Maker: Designing Grammars for Urban Design”. PhD dissertation. Delft University of Technology, Faculty of Architecture, Delft, Netherlands.

**Câmara Municipal de Lisboa.** 2011. “Regulamento da Revisão do Plano Diretor Municipal de Lisboa. Versão Final”.

**Duarte, José.** 2001. “Customizing Mass Housing: A Discursive Grammar for Siza’s Malagueira Houses”. PhD dissertation. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts, United States of America.

**Gruber, T. R.** 1993. “A Translation Approach to Portable Ontology Specifications”. *Knowledge Acquisition* 5: 199-220.

**Merritt, Frederick S. and Jonathan T. Ricketts.** [1958] 2000. *Building Design and Construction Handbook*. United States of America: McGraw-Hill Professional, 6th edition.

**Ritchie, Hannah e Max Roser.** 2019. *Renewable Energy*. Acedido a 25 de Julho de 2019. <https://ourworldindata.org/renewable-energy> [Recurso Online]

**Stiny, George, and James Gips.** 1971. “Shape Grammars and the Generative Specification of Painting and Sculpture”. In *Proceedings of the IFIP Congress 71, Ljubljana, Yugoslavia, August 1971*. Republished in *The Best Computer Papers of 1971*, edited by O R Petrocelli ,125-135. Auerbach, Philadelphia, 1972.

**Stiny, George.** 1980. “Introduction to shape and shape grammars”. *Environment and Planning B* 7: 343-351.

**Stiny, George.** 1981. “A note on the description of designs”. *Environment and Planning B* 8: 257-267.

**United Nations Environment and International Energy Agency.** 2017. “Towards a zero-emission, efficient and resilient buildings and construction sector”. Global Status Report 2017.

# **CAPÍTULO 5**

## **Gramática do Envelope de Edifícios**



## CAPÍTULO 5

### Gramática do Envelope de Edifícios

Neste capítulo descreve-se a Gramática do Envelope de Edifícios, a qual serve como instrumento conceptual para o projeto digital de envelopes de edifícios. São descritos os aspetos inerentes à sua conceção, tal como as gramáticas de forma e a gramática descritiva que a compõem. São também demonstrados alguns exemplos de aplicação da gramática do envelope de edifícios.

#### 5.1 Conceção da Gramática do Envelope de Edifícios

Para a elaboração de uma gramática que sirva como instrumento conceptual para o Projeto Digital de Envelopes de Edifícios, tiveram-se em atenção dois aspetos considerados essenciais:

1 – A pretensão de que a gramática possa ser aplicada em diferentes contextos de projeto, ou seja, para diferentes localizações geográficas, para diferentes enquadramentos legais, para diferentes condições ambientais, para diferentes tipologias de edifícios e para diferentes programas de edifícios, pretendendo-se que permita em simultâneo conceber qualquer forma para o envelope de um edifício. Desse modo, pretende-se que a gramática seja o mais “universal” possível, sendo o termo “universal” utilizado entre aspas na medida em que se trata de uma pretensão, não o sendo ainda e não estando ainda provado que o possa ser, de facto. Na presente tese, a gramática desenvolvida permite apenas, para diferentes localizações geográficas, para diferentes enquadramentos legais e para diferentes condições ambientais, gerar um conjunto diversificado de formas para o envelope das tipologias de edifícios de moradia unifamiliar isolada, a partir de uma forma paramétrica inicial composta por superfícies planas retangulares;

2 – Garantir que o desempenho energético, nomeadamente a irradiação solar incidente no envelope do edifício, seja um fator determinante na geração das formas da gramática;

O modo encontrado para a resolução destes aspetos consistiu em desenvolver uma gramática baseada no conceito de gramática discursiva desenvolvida por Duarte em “Customizing Mass Housing: A Discursive Grammar for Siza’s Malagueira Houses” (Duarte 2001, 25) e no conceito de gramática genérica elaborada por Beirão em “City Maker: Designing Grammars for Urban Design” (Beirão 2012, 92) e em “Generic grammars for design domains” (Beirão 2018, 225).

Conforme referido no capítulo anterior (Capítulo 4), uma gramática discursiva, assim designada porque permite a geração de projetos formalmente e semanticamente corretos (Duarte 2001, 26), é uma gramática que utiliza gramáticas de forma e gramáticas descritivas. As gramáticas de forma são gramáticas que lidam com aspetos formais e consistem em definições de forma, estabelecendo uma sintaxe composta por formas. As gramáticas descritivas lidam com semântica e consistem em descrições simbólicas de outros aspetos relevantes dos projetos ou do seu contexto, para além da forma (Duarte 2001, 25).

Uma gramática discursiva é descrita por um tuplo (D, U, G, H, S, L, W, T, F, I) (Duarte 2001, 344), em que:

- D é um conjunto de regras de descrição;
- U é uma descrição inicial, à qual a primeira regra de descrição se aplica para começar uma computação;
- G é a descrição objetivo, ou seja, a descrição do objeto pretendido;
- H é um conjunto de heurísticas que são usadas para decidir qual regra deve ser aplicada em cada estágio do processo de projeto, de modo a garantir que seja gerado um projeto com uma descrição que corresponda de perto ao objetivo pretendido;
- S é um conjunto de regras da forma  $A \rightarrow B$  que especifica que sempre que uma forma A é encontrada no projeto, pode ser substituída por uma forma B;

- L é um conjunto de símbolos que são usados para controlar o processo de computação;
- W é um conjunto de pesos associados com as formas em uma álgebra específica. Os pesos podem ser utilizados para controlar as computações, quando é atribuído significado aos pesos;
- T é o conjunto das transformações de similaridade (rotação, translação, escala, simetria);
- F é um conjunto de funções que atribui valores a parâmetros nas regras, como por exemplo: a largura e o comprimento de um retângulo;
- I é a forma inicial à qual a primeira regra se aplica para começar uma computação.

Já uma gramática genérica, também descrita no capítulo anterior (Capítulo 4), consiste em uma gramática que define uma linguagem de meta-design, a qual pode ser aplicada genericamente em um domínio de projeto ou design, independentemente das especificações locais ou idiossincrasias particulares de uma linguagem específica de projeto ou design (Beirão 2018, 225). Estabelecendo o contexto em que a gramática genérica é aplicada, através de decisões tomadas pelo projetista, é possível gerar diferentes gramáticas específicas, com linguagens mais concretas. Na tese de José Beirão, “City Maker: Designing Grammars for Urban Design” (Beirão 2012), uma gramática genérica é também formada por gramáticas discursivas e por uma ontologia (Beirão 2012, 92) que estabelece as relações entre os objetos criados pelas gramáticas discursivas. É possível, utilizando um programa de computador elaborado através da implementação da gramática genérica discursiva, gerar e criar projetos urbanos para cidades.

Outra investigação que também desenvolve o conceito de gramática genérica é a desenvolvida por Deborah Benrós. A sua tese tem o título “A generic housing grammar for the generation of different housing languages. A generic housing shape grammar for Palladian Villas, Prairie and Malagueira houses” (Benrós 2018). Benrós defende que as gramáticas genéricas, que são capazes de

descrever várias linguagens de projeto, permitem potencialmente maior flexibilidade e ajudam a descrever não apenas linguagens, mas também relações entre linguagens (Benrós 2018,0). Propõe por isso um processo de geração genérico para o projeto de habitações, baseado em uma gramática de forma paramétrica, e utiliza esse processo para investigar relações entre várias gramáticas ou famílias de projetos. Foi selecionado um caso de estudo de três gramáticas de habitação unifamiliar, utilizando as villas Palladianas, as casas da Pradaria e da Malagueira. A partir da análise do caso de estudo, é permitida a elaboração da gramática genérica de habitações. É usada também no decorrer desse processo a parametrização específica, de modo a conferir o senso de estilo necessário para a definição de uma linguagem, como por exemplo a linguagem das villas Palladianas, das casas da Pradaria e da Malagueira.

Na sua tese “Managing complexity in mass customization through design space subdivision: a case study in ceramic tableware design” (Castro e Costa 2018), Eduardo Castro e Costa também aborda o conceito de gramática genérica. Seis coleções de cerâmica de mesa foram codificadas em correspondentes gramáticas de forma específicas, as quais por sua vez foram combinadas em uma gramática genérica atual. Contudo, para ampliar o sistema de design, muitas outras coleções podem ser codificadas. Portanto, pode ser dito que a gramática genérica resultante dessa ampliação é “mais genérica”, ou “menos específica”, quando comparado com a atual (Castro e Costa 2018, 106). Como tal, no âmbito da investigação de Castro e Costa, uma gramática é “mais genérica” quando é capaz de gerar uma gama mais ampla de coleções do que uma gramática “mais específica”. Uma gramática mais genérica pode ser inferida da combinação de duas ou mais gramáticas específicas. Além disso, uma gramática mais específica pode ser extraída de uma gramática mais genérica através de um processo de especificação, selecionando regras da última, e especificando o intervalo dos valores de parâmetros para essas regras. É sugerido o uso da expressão “gramática geral” para designar a gramática mais genérica em um determinado momento. A gramática geral contém todas as regras inferidas de todas as coleções analisadas, podendo assim gerar cada uma dessas coleções. É possível restringir a geração de cada uma dessas coleções através de uma especificação da gramática geral. Sugere-se também

designar as gramáticas de forma específicas resultantes, as quais são só capazes de gerar uma única classe de coleções, como “gramáticas elementares” (Castro e Costa 2018, 106). É de realçar também que é sugerido o termo “genericidade” para designar a qualidade de uma gramática de forma ser mais genérica ou mais específica. Apesar de a “genericidade” não ter sido quantificada, parece ser possível ordenar duas gramáticas de forma, uma relativamente à outra, de acordo com essa qualidade. Assim sendo, parece ser um parâmetro relevante para controlar uma larga hierarquia de gramáticas de forma, sendo útil para ampliar a experiência da personalização em série da cerâmica de mesa (Castro e Costa 2018, 107). A aplicação do termo “genericidade” pode ser útil também em gramáticas de forma de objetos de outros domínios, sejam eles do design, da arquitetura ou do urbanismo.

A gramática desenvolvida para o envelope de edifícios (Gramática do Envelope de Edifícios) aproxima-se mais do modelo de gramática genérica desenvolvido por Beirão (Beirão 2018, 225), constituindo uma gramática genérica discursiva. Apresenta contudo a diferença de consistir em um caso particular do conceito teórico de algoritmo de forma (ou gramática “universal”), desenvolvido e descrito pelo autor da presente tese, no capítulo anterior (Capítulo 4). Por definição teórica, um algoritmo de forma pode conter qualquer forma inicial e pode gerar qualquer forma para o envelope de edifícios. A Gramática do Envelope de Edifícios constitui um caso particular de um algoritmo de forma, na medida em que especifica uma forma paramétrica inicial para o envelope dos edifícios, podendo ser geradas um leque diversificado de formas, para o envelope de edifícios. A Gramática do Envelope de Edifícios é genérica porque permite gerar diferentes gramáticas específicas de envelopes de edifícios, consoante as características pretendidas para o programa do edifício e consoante o contexto existente para o projeto do envelope do edifício. É discursiva na medida em que adota a estrutura de uma gramática discursiva, embora de um modo mais sintético e simplificado.

Ou seja, a estrutura da Gramática do Envelope de Edifícios é composta por um conjunto de gramáticas de forma e por uma gramática descritiva, não utilizando um conjunto de heurísticas, de pesos e de funções, como a gramática discursiva

original criada por Duarte (Duarte 2001, 499-500) para as casas da Malagueira do arquiteto Siza Vieira. A gramática descritiva constitui-se como uma gramática de programação, isto é, serve para programar as características do projeto pretendido (por exemplo, tipologia do edifício, área máxima de implantação, altura máxima do edifício, área bruta de construção máxima, entre outras) e para indicar o seu contexto (localização geográfica, irradiação solar incidente, temperatura, entre outros fatores). As gramáticas de forma são gramáticas de geração de descrições de forma e servem para gerar a solução ou soluções formais para o envelope do edifício, tendo em conta a programação que foi estabelecida na gramática descritiva. Em simultâneo com a geração de descrições de formas pelas gramáticas de forma, a gramática descritiva gera descrições simbólicas das descrições de forma geradas, tal como a descrição da irradiação solar incidente sobre uma determinada forma gerada. Como tal, a gramática descritiva também constitui uma gramática de geração.

De modo a se poder cumprir o objetivo de gerar soluções formais para o envelope de edifícios, através das gramáticas de geração (gramáticas de forma e gramática descritiva), que sejam adequadas às pretensões do projetista ou utilizador da gramática, podem ser também programadas através da gramática descritiva descrições de objetivos (o valor pretendido para a irradiação solar incidente no envelope do edifício, por exemplo). Ao se estabelecerem os valores para os objetivos pretendidos na gramática descritiva, as gramáticas de forma irão gerar soluções formais ótimas para o envelope dos edifícios, isto é, que cumpram com os valores estabelecidos para os objetivos pretendidos, através da aplicação das regras de transformação de forma. Durante o processo de geração de forma nas gramáticas de forma da Gramática do Envelope de Edifícios, as regras de transformação são aplicadas de acordo com a programação e os objetivos estabelecidos na gramática descritiva. Inicialmente, os valores dos parâmetros que definem as formas iniciais das gramáticas de forma são estabelecidos pela gramática descritiva. Posteriormente, as regras de transformação de forma são aplicadas de modo contínuo nas gramáticas de forma, às formas iniciais das gramáticas de forma, até se alcançarem os valores objetivo estabelecidos na gramática descritiva. O número de vezes que são aplicadas as regras de transformação poderá variar consoante o projeto do

envelope do edifício em questão, mas os valores objetivo serão alcançados, desde que sejam valores possíveis de alcançar.

Deste modo, a Gramática do Envelope de Edifícios contém na sua estrutura uma componente de otimização, inserida na gramática descritiva. O seu tipo de gramática genérica discursiva, oriundo do conceito teórico de algoritmo de forma (ou gramática “universal”), faz com que possa adotar diferentes formas iniciais e gerar um conjunto diversificado de formas para o envelope de um edifício, permanecendo as regras de transformação de forma sempre as mesmas. Isto permite que este tipo de gramática genérica discursiva possa ser utilizado também para processos de otimização de forma, constituindo uma alternativa a outros processos de otimização habitualmente utilizados, tais como os algoritmos genéticos, por exemplo (ver Capítulo 2, Estado da Arte).

A gramática genérica discursiva do envelope de edifícios é descrita por um tuplo (D, U, G, I, R, S, L), em que:

- D é um conjunto de regras de descrição, pertencentes à gramática descritiva;
- U é uma descrição inicial, pertencente à gramática descritiva, à qual as regras descritivas se aplicam para gerar a descrição objetivo;
- G é a descrição objetivo, pertencente à gramática descritiva, correspondendo à descrição dos objetivos do projeto pretendido;
- I é um conjunto de formas iniciais, pertencentes às diferentes gramáticas de forma, às quais se aplicam as regras de transformação de forma. As formas iniciais constituem uma álgebra  $U_{33}$  ;
- R é um conjunto de regras de transformação de forma, pertencentes às diferentes gramáticas de forma, do tipo  $A \rightarrow B$ , especificando que sempre que uma forma A é encontrada no projeto, pode ser substituída por uma forma B;

- S é um conjunto de formas, pertencentes às diferentes gramáticas de forma, as quais constituem a linguagem de formas da gramática do envelope de edifícios. O conjunto de formas S constitui uma álgebra  $U_{33}$ ;
- L é um conjunto de símbolos, pertencentes às diferentes gramáticas de forma, que servem de rótulos para a aplicação das regras de transformação de forma. O conjunto de símbolos L constitui uma álgebra  $V_{13}$ .

Através da gramática genérica discursiva do envelope de edifícios é possível obterem-se diferentes gramáticas específicas, também discursivas, do envelope de edifícios, conforme ilustrado na Figura 5.1. Tais gramáticas específicas emergem por meio da especificação do programa e do contexto do projeto do edifício, através dos quais são definidos os valores dos parâmetros que permitem definir a configuração e as dimensões para a forma inicial do envelope do edifício. São indicados para as gramáticas específicas referidas na Figura 5.1 exemplos concretos do programa geral e do contexto geral para cada uma dessas gramáticas. A partir do programa e do contexto indicados, podem depois ser definidos os valores dos parâmetros que estabelecem as características da forma inicial do envelope do edifício (configuração, comprimento, largura, altura, irradiação solar incidente, entre outros).

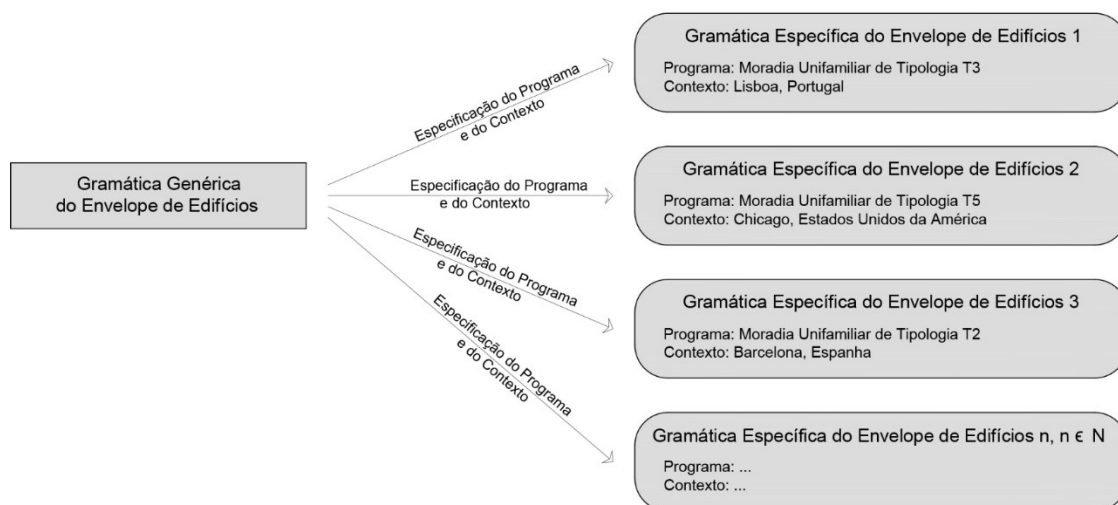


Figura 5.1 : Relação entre Gramática Genérica do Envelope de Edifícios e Gramáticas Específicas do Envelope de Edifícios.

Interessa ainda referir que a gramática genérica e as gramáticas específicas do envelope de edifícios relacionam-se com as outras áreas (como o espaço interior) da arquitetura de edifícios através do Sistema Arquitetura-Envelopes de Edifícios (Sistema AE) proposto no capítulo 4.

Pretende-se que a gramática genérica do envelope de edifícios, designada por Gramática do Envelope de Edifícios, tal como o Sistema Arquitetura-Envelopes de Edifícios (Sistema AE), venha a ser aplicada para o projeto do envelope de diferentes tipologias de edifícios, abrangendo diferentes programas, sejam estes programas de habitação, comércio, serviços (escritórios), uso misto (habitação com comércio e/ou com serviços), equipamentos, ou outros. No entanto, a presente tese desenvolve e utiliza a Gramática do Envelope de Edifícios apenas para a tipologia de edifícios de moradia unifamiliar isolada, demonstrando a aplicação da gramática em apenas esse exemplo concreto de tipologia de edifício.

## **5.2 Definição da Gramática do Envelope de Edifícios**

A gramática do envelope de edifícios pretende estabelecer um conjunto de operações que permitem a conceção de envelopes de edifícios, de modo a que estes obtenham um desempenho energético eficiente, ou seja, que gerem no mínimo a energia elétrica que o edifício necessita durante a fase de uso do seu ciclo de vida. A presente etapa da gramática desenvolve apenas o aspeto da capacidade de geração de energia por meio da forma do envelope do edifício, nomeadamente através da capacidade desta em captar a irradiação solar incidente, prevendo-se numa etapa mais avançada também o desenvolvimento do aspeto do consumo de energia por meio da forma do envelope do edifício.

Para a definição da gramática, estabeleceu-se uma metodologia ou conjunto de procedimentos que permitem a formação de qualquer tipo de forma, independentemente do contexto e das características programáticas do edifício para o qual o envelope é projetado. Tal metodologia consiste nas fases indicadas no capítulo 4 (ver Figura 4.6: Relação entre as gramáticas da Gramática do Envelope de Edifícios e as fases da metodologia do Projeto Digital de Envelopes

de Edifícios). As fases em questão são realizadas por meio das diferentes gramáticas paralelas (gramáticas de forma e gramática descritiva) que compõem a gramática do envelope de edifícios. As gramáticas de forma permitem estabelecer as formas dos objetos referentes ao envelope dos edifícios, definindo a sintaxe da gramática. A gramática descritiva permite estabelecer as características simbólicas que caracterizam as formas da gramática, constituindo como tal a sua semântica. A primeira fase da metodologia estabelecida para a gramática do envelope de edifícios corresponde à Fase A (Definir Contexto, Programa e Espaço Interior), sendo esta fase concretizada através da gramática descritiva. A gramática descritiva define um conjunto de características que descrevem o contexto, o programa e o espaço interior do projeto para o edifício em questão. É composta por quatro grupos de características (Contexto Legal, Contexto Ambiental, Programa e Espaço Interior), cada um dos quais contendo um conjunto de variáveis (ou parâmetros) que podem assumir diferentes valores. O conjunto das variáveis, através dos diferentes valores que podem assumir, descrevem o projeto do envelope de um edifício. Os grupos de características, as suas variáveis, bem como os valores que as variáveis podem assumir, são indicados na Figura 5.2, a qual ilustra uma tabela com esses elementos que definem a gramática descritiva.

No que diz respeito aos valores que as variáveis podem assumir, a gramática descritiva do envelope de edifícios apresenta uma novidade face a gramáticas descritivas desenvolvidas anteriormente, como a desenvolvida por Duarte em “Customizing Mass Housing: A Discursive Grammar for Siza’s Malagueira Houses” (Duarte 2001, 348). Para além de valores numéricos e alfabéticos, as variáveis da gramática descritiva do envelope de edifícios podem assumir valores de formas, formas essas que tal como os números e os caracteres, constituem atributos das formas que são geradas pelas gramáticas de forma. Por exemplo, uma forma de um envelope pode ter como atributo as formas dos pisos que compõem o interior do edifício ao qual esse envelope pertence.

Os valores das variáveis dos grupos de características da gramática descritiva são atribuídos pelo utilizador, de um modo sequencial, através de regras da gramática descritiva.

GRUPOS DE CARACTERÍSTICAS	VARIÁVEIS			TIPOS DE VARIÁVEIS	VALORES ALFANUMÉRICOS E FORMAIS	
	NOME		SÍMBOLO			
Contexto Legal	Índice de permeabilidade	permitido	cl1.1	< float >	[0,1]	
		projetado	cl1.2			
	Índice de edificabilidade	permitido	cl2.1	< float >	[0,1]	
		projetado	cl2.2			
	Altura (metros)	permitido	cl3.1	< float >	[0, r], r ∈ ℝ	
		projetado	cl3.2			
	Número de pisos	permitido	cl4.1	< int >	[0, n], n ∈ ℕ	
		projetado	cl4.2			
	Área de implantação (m <sup>2</sup> )	permitido	cl5.1	< float >	[0, r], r ∈ ℝ	
		projetado	cl5.2			
	Área bruta de construção (m <sup>2</sup> )	permitido	cl6.1	< float >	[0, r], r ∈ ℝ	
		projetado	cl6.2			
	Área útil total (m <sup>2</sup> )	permitido	cl7.1	< float >	[0, r], r ∈ ℝ	
		projetado	cl7.2			
	Constrangimentos de implantação	Alinhamento com o plano marginal do edificado		cl8	< guid >	$I_n \in \text{Lot Grammar L}$
Máxima profundidade de empena				cl9.1	< float >	[0, r], r ∈ ℝ
				cl9.2	< guid >	$I_n \in \text{Lot Grammar L}$
Outros constrangimentos				cl10.1	< float >	[0, r], r ∈ ℝ
			cl10.2	< guid >	$I_n \in \text{Lot Grammar L}$	
Área de edificação (m <sup>2</sup> )			cl11	< float >	[0, r], r ∈ ℝ	
Outros			?	?	?	
Contexto Ambiental	Irradiação Solar Incidente (kWh/m <sup>2</sup> )	pretendida por m <sup>2</sup>	ca1.1	< int >	[0, n], n ∈ ℕ	
		projetada por m <sup>2</sup>	ca1.2			
		total	ca2			< int >
	Temperatura (°C)			ca3	< float >	[-n, n], n ∈ ℕ
	Iluminação (lux)			ca4	< int >	[0, n], n ∈ ℕ
	Nível Sonoro (dB)			ca5	< int >	[0, n], n ∈ ℕ
	Outros			?	?	?
Programa	Tipologia	Identificação	p1	< str >	[T0, T1, T2, T3, T4, T5]	
		Área (m <sup>2</sup> )	p2	< float >	[0, n], n ∈ ℕ	
	Desempenho energético	pretendido	p3.1	< int >	[-n, n], n ∈ ℕ	
		projetado	p3.2	< int >	[-n, n], n ∈ ℕ	
	Outros			p4	?	?
Espaço Interior	Espaços de Circulação	Área total	eic1	< float >	[0, r], r ∈ ℝ	
		Altura total	eic2	< float >	[0, r], r ∈ ℝ	
		Volume total	eic3	< float >	[0, r], r ∈ ℝ	

		Forma geral	eic4	< guid >	EC1
		Numero de Pisos	eic5	< int >	[0, n], n ∈ N
		Área Piso i	eic6.1	< float >	[0, r], r ∈ R
		Pé-direito Piso i	eic6.2	< float >	[0, r], r ∈ R
		Volume Piso i	eic6.3	< float >	[0, r], r ∈ R
		Forma Piso i	eic6.4	< guid >	EC2
		Outros	?	?	?
	Espaços de Permanência	Numero	eip1	< int >	[0, n], n ∈ N
		Função i	eip2.1	< str >	[Quarto, Sala de Estar, Sala de Jantar, Cozinha, Casa de Banho, Despensa, Outro]
		Área i	eip2.2	< float >	[0, r], r ∈ R
		Pé-direito Espaço i	eip2.3	< float >	[0, r], r ∈ R
		Volume i	eip2.4	< float >	[0, r], r ∈ R
		Forma i	eip2.5	< guid >	EP1
		Função i	eip3.1	< str >	[Quarto, Sala de Estar, Sala de Jantar, Cozinha, Casa de Banho, Despensa, Outro]
		Área i	eip3.2	< float >	[0, r], r ∈ R
		Pé-direito Espaço i	eip3.3	< float >	[0, r], r ∈ R
		Volume i	eip3.4	< float >	[0, r], r ∈ R
		Forma i	eip3.5	< guid >	EP2
		Outros	?	?	?
		Consumo Energético	eice1	< int >	[0, n], n ∈ N

Figura 5.2 : Tabela com os Grupos de Características, Variáveis, Tipos de Variáveis e Valores Alfanuméricos e Formais da gramática descritiva.

O processo funciona do seguinte modo: uma descrição inicial U da gramática descritiva é elaborada por meio da regra d0 do conjunto de regras D da gramática descritiva. Um exemplo de descrição inicial U é ilustrado nas Figuras 5.3 e 5.4. A Figura 5.3 mostra a descrição inicial em formato de variáveis e a Figura 5.4 mostra a mesma descrição inicial com o formato dos valores que são atribuídos a essas mesmas variáveis.

```
# cl1.1 # cl1.2 # cl2.1 # cl2.2 # cl3.1 # cl3.2 # cl4.1 # cl4.2 # cl5.1 # cl5.2 # cl6.1 # cl6.2
# cl7.1 # cl7.2 # cl8 # cl9.1 # cl9.2 # cl10.1 # cl10.2 # cl11 # ca1.1 # ca1.2 # ca2 # ca3
# ca4 # ca5 # p1 # p2 # p3.1 # p3.2 # eic1 # eic2 # eic3 # eic4 # eic5 # eic6.1 # eic6.2
# eic6.3 # eic6.4 # eip1 # eip2.1 # eip2.2 # eip2.3 # eip2.4 # eip2.5 # eip3.1 # eip3.2
# eip3.3 # eip3.4 # eip3.5 # eice1
```

Figura 5.3 : Descrição inicial U da gramática descritiva em formato de variáveis.

```
# 0 # 0 # 0 # 0 # 0 # 0 # 0 # 0 # 0 # 0 # 0 # 0 # 0 # 0 # 0 # 0 # 0
# 0 # 0 # 0 # 0 # 0 # 0 # 0 # 0 # 0 # 0 # 0 # 0 # 0 # 0 # 0 # 0
# 0 # 0 # 0 # 0 # 0 # 0 # 0 # 0 # 0 # 0 # 0 # 0 # 0 # 0 # 0 # 0
# 0 # 0 # 0 # 0 # 0 # 0 # 0 # 0 # 0 # 0 # 0 # 0 # 0 # 0 # 0
# 0 # 0 # 0 # 0
```

Figura 5.4 : Descrição inicial U da gramática descritiva em formato de valores.

Após a elaboração da descrição inicial, a qual inicia sempre um processo de elaboração de uma gramática descritiva, novas regras descritivas se aplicam. O conjunto das regras descritivas da gramática do envelope de edifícios é composto por cinco regras, incluindo a regra de formação da descrição inicial.

A Figura 5.5 ilustra o exemplo de uma regra da gramática descritiva, a Regra d0 da Descrição Inicial.

Descrição Inicial da Gramática do Envelope de Edifícios				
d0:				
cl1.1 ← 0	cl1.2 ← 0	cl2.1 ← 0	cl2.2 ← 0	cl3.1 ← 0
cl3.2 ← 0	cl4.1 ← 0	cl4.2 ← 0	cl5.1 ← 0	cl5.2 ← 0
cl6.1 ← 0	cl6.2 ← 0	cl7.1 ← 0	cl7.2 ← 0	cl8 ← ∅
cl9.1 ← 0	cl9.2 ← ∅	cl10.1 ← 0	cl10.2 ← ∅	cl11 ← ∅
ca1.1 ← 0	ca1.2 ← 0	ca2 ← 0	ca3 ← 0	ca4 ← 0
ca5 ← 0	ca6 ← ?	p1 ← ∅	p2 ← 0	p3.1 ← 0
p3.2 ← 0	p4 ← ?	eic1 ← 0	eic2 ← 0	eic3 ← 0
eic4 ← ∅	eic5 ← 0	eic6.1 ← 0	eic6.2 ← 0	eic6.3 ← 0
eic6.4 ← ∅	eip1 ← 0	eip2.1 ← ∅	eip2.2 ← 0	eip2.3 ← 0
eip2.4 ← 0	eip2.5 ← ∅	eip3.1 ← ∅	eip3.2 ← 0	eip3.3 ← 0
eip3.4 ← 0	eip3.5 ← ∅	eice1 ← 0		

Figura 5.5 : Regra d0 da gramática descritiva, de Descrição Inicial da Gramática do Envelope de Edifícios.

A totalidades das regras da gramática descritiva encontra-se nos anexos A5.1 a A5.5. O formato das regras segue as convenções utilizadas por Stiny em “A note on the description of designs” (Stiny 1981, 263) e por Duarte em “Customizing Mass Housing: A Discursive Grammar for Siza’s Malagueira Houses” (Duarte 2001, 398). Através da aplicação das cinco regras da gramática descritiva (d0: Iniciar Descrição, d1: Especificar o Contexto Legal do Edifício, d2: Especificar o Contexto Ambiental, d3: Especificar o Programa do Edifício, d4: Especificar o Espaço Interior do Edifício), é possível evoluir da descrição inicial U para a

descrição objetivo G. A descrição objetivo G tem o mesmo formato de variáveis que a descrição inicial U, mas contém valores diferentes, os quais são indicados pelo utilizador da gramática do envelope através das regras da gramática descritiva. É na descrição objetivo G que estão presentes os valores que servem de objetivo para o processo de otimização da Gramática do Envelope de Edifícios. Mais especificamente, na etapa da Gramática do Envelope de Edifícios desenvolvida na presente tese, os valores que podem definir o objetivo inserem-se no grupo de características do Contexto Ambiental e referem-se à variável “Irradiação Solar Incidente pretendida por m<sup>2</sup>”.

As fases seguintes da gramática, após a Fase A (Definir Contexto, Programa e Espaço Interior), são as Fases B (Definir Forma Inicial do Envelope), Fase C (Definir Orientação do Edifício), Fase D (Definir Forma Final do Envelope), Fase E (Definir Zonas Opacas, Zonas Não Opacas e Outras), Fase F (Definir Zonas de Geração de Energia) e Fase G (Definir Estrutura e Materiais de Construção). Na etapa da gramática elaborada na presente tese, são desenvolvidas apenas as Fases A, B, C e D. As Fases E, F e G serão desenvolvidas numa etapa posterior de investigação. Para a elaboração das Fases B, C e D definiu-se um conjunto de operações que permitem gerar envelopes de edifícios com um eficiente desempenho energético no que se refere à irradiação solar incidente no envelope. O conjunto de operações estabelecido é o seguinte:

→ **Forma Inicial:**

corresponde à definição de uma forma inicial, sobre a qual são efetuadas transformações de modo a se obterem formas com um eficiente desempenho energético, no que se refere à irradiação solar incidente no envelope do edifício;

→ **Avaliação:**

corresponde à avaliação da irradiação solar incidente sobre a forma do envelope do edifício. A avaliação é feita em dois modos: o valor da irradiação incidente por metro quadrado de superfície do envelope e o valor total da irradiação incidente no envelope. O primeiro valor serve de objetivo na gramática durante o processo de geração das formas do envelope, pois relaciona-se com a eficiência da forma do envelope em

captar o máximo de irradiação solar incidente por  $m^2$  de superfície. O segundo valor não serve de objetivo, sendo entendido como um valor que é consequência do primeiro valor;

→ **Rotação:**

permite a rotação da forma do envelope do edifício;

→ **Normalização:**

transforma uma superfície do envelope de modo a torná-la uma superfície perpendicular aos raios solares, de acordo com uma posição escolhida da trajetória solar ao longo do ano;

→ **Divisão:**

divide uma superfície do envelope em duas superfícies.

Para a aplicação desse conjunto de operações, são definidas cinco etapas, ao longo das quais esse conjunto de operações é executado. As cinco etapas definidas podem ser visualizadas na figura 5.6, sendo essas etapas as seguintes:

1 – É estabelecida uma forma inicial para o envelope do edifício, por intermédio da forma inicial do lote e das regras 1, 2 e 3 da Gramática do Envelope de Edifícios. Esta etapa corresponde à Fase B indicada na Figura 4.6 do capítulo 4;

2 – A irradiação incidente na forma do envelope é avaliada através das regras 4, 5, 6 e 7 da gramática;

3 – Se for pretendido melhorar o desempenho da forma do envelope, é possível realizar dois tipos de operações de transformação:

3.1 – uma operação de Rotação (através das regras 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14 e 15), rodando o envelope do edifício ao longo de  $360^\circ$ , no local onde o edifício se encontra implantado. Pretende-se que a rotação possa ser feita de um modo automático (através do computador) ou de um modo manual (através do utilizador);

3.2 – uma operação de Normalização (através das regras 16, 17, 18, 19, 20 e 21), tornando uma ou mais superfícies do envelope do

edifício perpendiculars a posições escolhidas do sol ao longo da sua trajetória anual. A normalização pode ser feita de um modo automático (por computador) ou de um modo manual (o utilizador escolhe a superfície do envelope que deve ser normalizada e quais as posições do sol que devem ser utilizadas como referência);

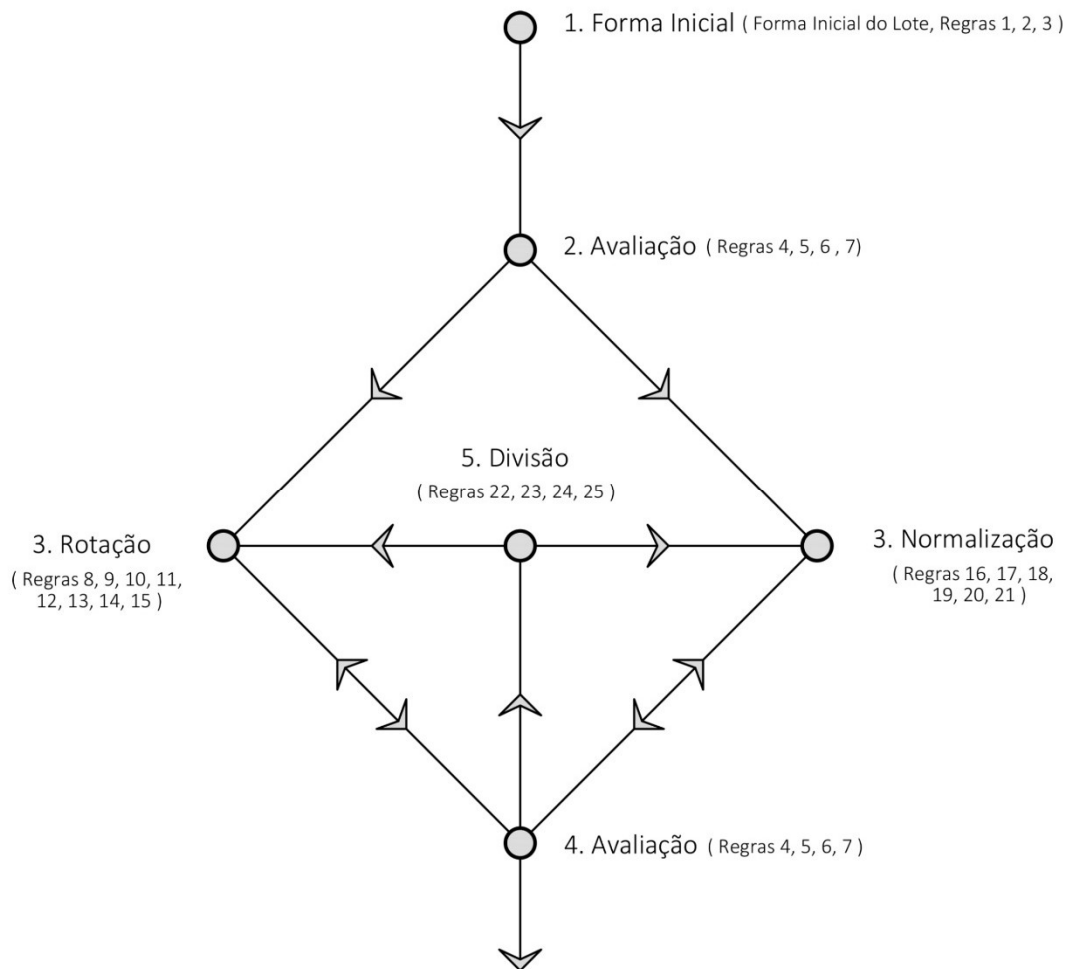


Figura 5.6 : Etapas e operações de transformação da gramática do envelope de edifícios.

4 – Após as operações de transformação de forma, a irradiação incidente no envelope é novamente avaliada, através das regras 4, 5, 6 e 7 da gramática do envelope. Após a avaliação, duas condições são tidas em consideração:

1 – são obtidos valores satisfatórios para a irradiação incidente no envelope;

2 – as qualidades estéticas do envelope são consideradas satisfatórias pelo utilizador;

Caso estas condições sejam cumpridas, são aplicadas novas etapas da gramática, a serem desenvolvidas posteriormente, como por exemplo: o desenvolvimento de operações que adicionem e eliminem volumes e superfícies ao envelope do edifício, operações que permitam definir as zonas opacas e não opacas do envelope, operações que permitam definir as zonas de geração de energia no envelope e operações que permitam definir a estrutura e os materiais de construção do envelope. Caso as duas condições consideradas no ponto 4 não sejam cumpridas, é aplicada a etapa 5;

5 – Se após a nova avaliação da irradiação incidente os valores obtidos não forem satisfatórios e/ou se forem pretendidas novas transformações, pode ser realizada uma operação de Divisão de uma ou mais superfícies do envelope (através das regras 22, 23, 24 e 25). Pode então depois ser executada uma nova operação de transformação da etapa 3. A sequência de etapas 5, 3 e 4 repete-se ciclicamente até as duas condições descritas na etapa 4 serem alcançadas.

O conjunto de operações e as etapas descritas são concretizadas através das gramáticas de forma da Gramática do Envelope de Edifícios, nomeadamente:

- a Gramática de Forma A do Envelope do Edifício (constitui o conjunto que engloba as restantes gramáticas de forma);
- a Gramática de Forma L do Lote;
- a Gramática de Forma E do Edifício Isolado;
- a Gramática de Forma T das Superfícies do Envelope do Edifício;
- a Gramática de Forma M dos Operadores (permite que o conjunto de operações possa ser aplicado a qualquer forma definida para o envelope).

A gramática descritiva orienta o processo de formação das formas nas diferentes gramáticas de forma, através dos valores das suas variáveis. Paralelamente, integra também valores que são obtidos pelas formas geradas nas gramáticas de forma. Por exemplo, os valores da irradiação incidente nas formas geradas para o envelope do edifício.

Apresentam-se nos Anexos A5.6 a A5.32 a Forma Inicial e as Regras elaboradas para as Fases B, C e D da Gramática do Envelope de Edifícios. Para a elaboração destas fases da gramática foram definidos um retângulo paramétrico para a forma inicial do lote e um paralelepípedo também paramétrico para a forma inicial do envelope do edifício. No entanto, as formas iniciais do lote e do envelope do edifício podem ser outras, sendo as regras da gramática válidas para diferentes formas, desde que estas sejam compostas por superfícies planas retangulares. A Forma Inicial e as Regras indicadas integram as diferentes gramáticas de forma e a gramática descritiva, compondo a Gramática do Envelope de Edifícios que se constitui, como foi atrás referido, como uma gramática genérica discursiva.

As Figuras 5.7 a 5.10 mostram dois exemplos de regras da Gramática do Envelope de Edifícios, a Regra 17 e a Regra 20. A Regra 17, ilustrada nas Figuras 5.7 e 5.8, ativa a gramática dos operadores da Gramática do Envelope de Edifícios, a qual permite que as regras e as transformações da Gramática do Envelope de Edifícios possam ser aplicadas a qualquer forma composta por superfícies planas retangulares. No caso ilustrado na Figura 5.7, essa forma é um paralelepípedo, mas pode ser outra forma que seja composta por superfícies planas retangulares. A mesma Figura 5.7 mostra as várias transformações de forma da Regra 17 da Gramática do Envelope de Edifícios, para cada uma das gramáticas de forma paralelas (Gramática do Lote, Gramática do Edifício, Gramática das Superfícies e Gramática dos Operadores). A Figura 5.8 mostra a descrição da gramática descritiva referente à Regra 17 da Gramática do Envelope de Edifícios. As Figuras 5.9 e 5.10 ilustram a Regra 20 da Gramática do Envelope de Edifícios, onde se efetua a transformação da forma específica que é ilustrada no exemplo, ou seja, um paralelepípedo. Após ser feita a operação de Normalização na gramática dos operadores, é possível efetuar a

operação de Normalização na forma específica do paralelepípedo através da Regra 20. A Figura 5.9 mostra as várias transformações de forma da Regra 20 da Gramática do Envelope de Edifícios, para cada uma das gramáticas de forma paralelas (Gramática do Lote, Gramática do Edifício, Gramática das Superfícies e Gramática dos Operadores). A Figura 5.10 mostra a descrição da gramática descritiva referente à Regra 20 da Gramática do Envelope de Edifícios.

Importa referir de novo que a Gramática do Envelope de Edifícios foi desenvolvida tendo como foco a tipologia de edifícios de moradia unifamiliar isolada. No entanto, a Gramática do Envelope de Edifícios pode vir a ser aplicada a outras tipologias de edifícios de habitação, bem como a outras tipologias e programas de edifícios, como sejam os de comércio, serviços (escritórios), uso misto (habitação com comércio e/ou com serviços), equipamentos, ou outros. A sua estrutura composta por gramáticas paralelas e as suas regras de transformação podem vir a ser aplicadas para o projeto do envelope de diferentes tipologias e programas de edifícios.

As diferenças, na Gramática do Envelope de Edifícios, do programa de uma moradia unifamiliar isolada para outros tipos de programas, estão relacionadas com os seguintes aspetos:

→ Dimensões do lote e da forma inicial do envelope: as dimensões do lote e da forma inicial do envelope, da Gramática do Envelope de Edifícios, são diferentes consoante o programa do edifício. Se este for o de uma moradia unifamiliar isolada, os valores das dimensões do lote e da forma inicial do envelope são de uma ordem de grandeza diferente da de um edifício de habitação coletiva, por exemplo. Assim, os valores do comprimento e da largura do lote tendem a ser menores no caso da moradia unifamiliar isolada e maiores no caso do edifício de habitação coletiva, tal como os valores do comprimento, largura e altura da forma inicial tendem a ser menores no caso da moradia unifamiliar isolada e maiores no caso do edifício de habitação coletiva em altura. A ordem de grandeza dos valores em questão podem ser definidos nas gramáticas de forma da Gramática do Envelope de Edifícios, nos parâmetros “Distâncias” e “Dimensões” do lote e da forma inicial do envelope, sendo esses valores diferentes consoante o

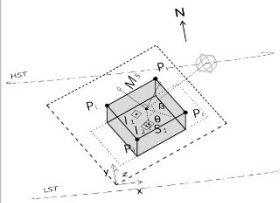
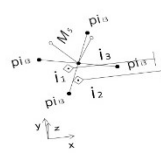
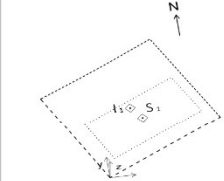

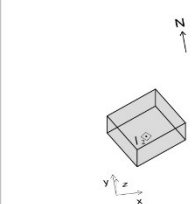
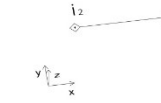
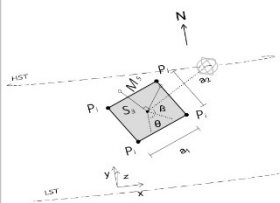
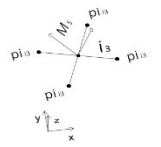

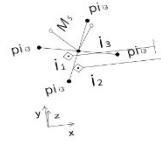
Gramáticas	Componentes	
<p><b>Gramática do Envelope de Edifícios A</b></p> <p>Tipo de Gramática: Forma, Descritiva</p> <p>Álgebra &lt;formas,símbolos&gt;: &lt; <math>U_{33} V_{03}</math> &gt;</p> <p>Tipo de vista: Axonometria</p>		 <p>Formas &lt; <math>I_i, i_i, S_i, p_i</math> &gt; Operadores &lt; <math>M_i, MG_i</math> &gt; <math>MGi_1 = 0, MG_i2 = 0, MG_i3 = 0</math> (ativa a Gramática dos Operadores) Ângulos &lt; <math>\theta, \beta</math> &gt; <math>0^\circ \leq \theta \leq 360^\circ,</math> <math>0^\circ \leq \beta \leq 180^\circ</math> 4P<sub>i</sub> com maior altura Z</p>
<p><b>Gramática do Lote L</b></p> <p>Tipo de Gramática: Forma</p> <p>Álgebra &lt;formas,símbolos&gt;: &lt; <math>U_{23} V_{03}</math> &gt;</p> <p>Tipo de vista: Axonometria</p>		 <p>Formas &lt; <math>i_i, S_i</math> &gt; Operadores &lt; <math>MG_i</math> &gt; <math>MG_i1 = 0</math> (ativa a Gramática dos Operadores)</p>
<p><b>Gramática do Edifício E</b></p> <p>Tipo de Gramática: Forma</p> <p>Álgebra &lt;formas,símbolos&gt;: &lt; <math>U_{33} V_{03}</math> &gt;</p> <p>Tipo de vista: Axonometria</p>		 <p>Formas &lt; <math>i_i, S_i</math> &gt; Operadores &lt; <math>MG_i</math> &gt; <math>MG_i2 = 0</math> (ativa a Gramática dos Operadores)</p>
<p><b>Gramática das Superfícies T</b></p> <p>Tipo de Gramática: Forma</p> <p>Álgebra &lt;formas,símbolos&gt;: &lt; <math>U_{33} V_{03}</math> &gt;</p> <p>Tipo de vista: Axonometria</p>		 <p>Formas &lt; <math>I_i, S_i, P_i, p_i</math> &gt; Dimensões &lt; <math>a_i</math> &gt; <math>i \in N^*, a_i \in R</math> Operadores &lt; <math>M_i, MG_i</math> &gt; <math>MG_i3 = 0</math> (ativa a Gramática dos Operadores) Ângulos &lt; <math>\theta, \beta</math> &gt; <math>0^\circ \leq \theta \leq 360^\circ</math> <math>0^\circ \leq \beta \leq 180^\circ</math> 4P<sub>i</sub> com maior altura Z</p>
<p><b>Gramática dos Operadores M</b></p> <p>Tipo de Gramática: Forma</p> <p>Álgebra &lt;formas,símbolos&gt;: &lt; <math>U_{13} V_{03}</math> &gt;</p> <p>Tipo de vista: Axonometria</p>		 <p>Formas &lt; <math>i_i, p_i</math> &gt; Operadores &lt; <math>M_i, MG_i</math> &gt; <math>MG_i1 = 0, MG_i2 = 0, MG_i3 = 0</math> (ativa a Gramática dos Operadores) Ângulos &lt; <math>\theta, \beta</math> &gt; <math>0^\circ \leq \theta \leq 360^\circ</math> <math>0^\circ \leq \beta \leq 180^\circ</math></p>

Figura 5.7 : Regra 17 da Gramática do Envelope de Edifícios (transformações de forma nas gramáticas de forma paralelas) - Ativa a gramática dos operadores, através do operador de normalização. A gramática dos operadores permite que as transformações de forma possam ser feitas para diferentes formas, compostas por superfícies planas retangulares, que sejam definidas para o envelope de um edifício. No exemplo mostrado, a forma do envelope é um paralelepípedo, mas poderia ser outra, desde que composta por superfícies planas retangulares.

<p><b>Gramática Descritiva D</b></p> <p>Tipo de Gramática:                  Descritiva</p> <p>Categoria:                  Contexto Legal                  Contexto Ambiental                  Programa                  Espaço Interior</p>	<p># cl1.1 # cl1.2 # cl2.1 # cl2.2 # cl3.1 # cl3.2 # cl4.1 # cl4.2 # cl5.1 # cl5.2 # cl6.1 # cl6.2                  # cl7.1 # cl7.2 # cl8 # cl9.1 # cl9.2 # cl10.1 # cl10.2 # cl11 # ca1.1 # ca1.2 # ca2 # ca3 #                  ca4 # ca5 # p1 # p2 # p3.1 # p3.2 # eic1 # eic2 # eic3 # eic4 # eic5 # eic6.1 # eic6.2 #                  eic6.3 # eic6.4 # eip1 # eip2.1 # eip2.2 # eip2.3 # eip2.4 # eip2.5 # eip3.1 # eip3.2 #                  eip3.3 # eip3.4 # eip3.5</p>	
---	---	--

Figura 5.8 : Regra 17 da Gramática do Envelope de Edifícios (descrição da gramática descritiva) – Indicação das variáveis da gramática descritiva que descrevem as características das formas presentes na regra 17.

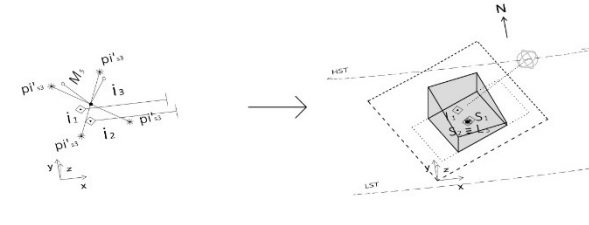


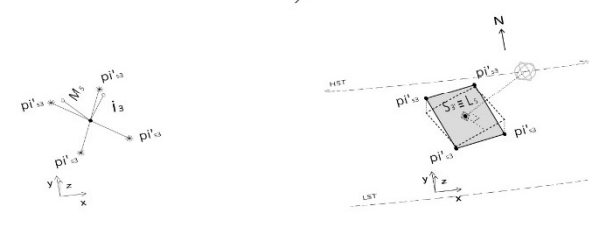

Gramáticas		Componentes
<p><b>Gramática do Envelope de Edifícios A</b></p> <p>Tipo de Gramática: Forma, Descritiva</p> <p>Álgebra &lt;formas,símbolos&gt;: &lt; <math>U_{33} V_{03}</math> &gt;</p> <p>Tipo de vista: Axonometria</p>		<p>Formas &lt; <math>I_i, i_i, S_i, p_i</math> &gt;                  Símbolos &lt; <math>L_i</math> &gt;                  Operadores &lt; <math>M_i, MG_i</math> &gt;  <math>MGi_1 = 1, MGi_2 = 1, MGi_3 = 1</math> (ativa a Visualização das Formas)                  Valores de Irradiação Incidente &lt; <math>IR_i</math> &gt;</p>
<p><b>Gramática do Lote L</b></p> <p>Tipo de Gramática: Forma</p> <p>Álgebra &lt;formas,símbolos&gt;: &lt; <math>U_{23} V_{03}</math> &gt;</p> <p>Tipo de vista: Axonometria</p>		<p>Formas &lt; <math>I_i, i_i, S_i</math> &gt;                  Operadores &lt; <math>MG_i</math> &gt;  <math>MGi_1 = 1</math> (ativa a Visualização das Formas)</p>
<p><b>Gramática do Edifício E</b></p> <p>Tipo de Gramática: Forma</p> <p>Álgebra &lt;formas,símbolos&gt;: &lt; <math>U_{33} V_{03}</math> &gt;</p> <p>Tipo de vista: Axonometria</p>		<p>Formas &lt; <math>I_i, i_i, S_i</math> &gt;                  Operadores &lt; <math>MG_i</math> &gt;  <math>MGi_2 = 1</math> (ativa a Visualização das Formas)                  Valores de Irradiação Incidente &lt; <math>IR_i</math> &gt;</p>
<p><b>Gramática das Superfícies T</b></p> <p>Tipo de Gramática: Forma</p> <p>Álgebra &lt;formas,símbolos&gt;: &lt; <math>U_{23} V_{03}</math> &gt;</p> <p>Tipo de vista: Axonometria</p>		<p>Formas &lt; <math>I_i, i_i, S_i, p_i</math> &gt;                  Símbolos &lt; <math>L_i</math> &gt;                  Operadores &lt; <math>M_i, MG_i</math> &gt;  <math>MGi_3 = 1</math> (ativa a Visualização das Formas)                  Valores de Irradiação Incidente &lt; <math>IR_i</math> &gt;</p>
<p><b>Gramática dos Operadores M</b></p> <p>Tipo de Gramática: Forma</p> <p>Álgebra &lt;formas,símbolos&gt;: &lt; <math>U_{13} V_{03}</math> &gt;</p> <p>Tipo de vista: Axonometria</p>		<p>Formas &lt; <math>i_i</math> &gt;                  Operadores &lt; <math>M_i, MG_i</math> &gt;  <math>MGi_1 = 1, MGi_2 = 1, MGi_3 = 1</math> (ativa a Visualização das Formas)                  Valores de Irradiação Incidente &lt; <math>IR_i</math> &gt;</p>

Figura 5.9 : Regra 20 da Gramática do Envelope de Edifícios (transformações de forma nas gramáticas de forma paralelas) – Termina a gramática dos operadores e devolve a forma transformada do envelope do edifício, após a operação de normalização na superfície escolhida do envelope.

Gramática Descritiva D	
Tipo de Gramática: Descritiva	# cl1.1 # cl1.2 # cl2.1 # cl2.2 # cl3.1 # cl3.2 # cl4.1 # cl4.2 # cl5.1 # cl5.2 # cl6.1 # cl6.2 # cl7.1 # cl7.2 # cl8 # cl9.1 # cl9.2 # cl10.1 # cl10.2 # cl11 # ca1.1 # ca1.2 # ca2 # ca3 # ca4 # ca5 # p1 # p2 # p3.1 # p3.2 # eic1 # eic2 # eic3 # eic4 # eic5 # eic6.1 # eic6.2 # eic6.3 # eic6.4 # eip1 # eip2.1 # eip2.2 # eip2.3 # eip2.4 # eip2.5 # eip3.1 # eip3.2 # eip3.3 # eip3.4 # eip3.5
Categoria: Contexto Legal Contexto Ambiental Programa Espaço Interior	

Figura 5.10 : Regra 20 da Gramática do Envelope de Edifícios (descrição da gramática descritiva) – Indicação das variáveis da gramática descritiva que descrevem as características das formas presentes na regra 20.

programa do edifício em projeto.

→ Características do Programa: a variável “Identificação”, relativa às tipologias que são possíveis de escolher, na gramática descritiva (ver Figura 5.2), pode assumir apenas valores relativos às tipologias de moradias unifamiliares isoladas (T0, T1, T2, T3, T4, T5). Assim sendo, os valores que a variável “Identificação” pode assumir devem ser ampliados de modo a que a Gramática do Envelope de Edifícios possa ser aplicada a outras tipologias e programas de edifícios para além do programa de moradia unifamiliar isolada;

→ Características do Espaço Interior: as funções que foram definidas para os espaços de permanência, na gramática descritiva (ver Figura 5.2), dizem respeito às funções dos espaços presentes nas tipologias de moradias unifamiliares isoladas (podendo também ser aplicadas em outras tipologias de edifícios de habitação), tais como quarto, sala de jantar, cozinha, entre outros. Se o edifício em projeto for de outro programa que não o de moradia unifamiliar isolada (e de outro programa que não o de habitação), as funções dos espaços de permanência serão outras. Como tal, os valores que as variáveis “Função” podem assumir devem ser ampliadas de modo a que a Gramática do Envelope de Edifícios possa ser aplicada a outros programas de edifícios para além do programa de moradia unifamiliar isolada (e para além do programa de habitação);

→ Complexidade formal: na atual versão, a Gramática do Envelope de Edifícios define, para a forma inicial do envelope, um paralelepípedo paramétrico com uma zona interior vazada, sendo também essa zona interior vazada um paralelepípedo paramétrico. Isso possibilita que a forma inicial assuma diversas configurações diferentes. Contudo, é possível que a morfologia de um edifício seja mais complexa, quer o programa do edifício seja o de moradia unifamiliar isolada, quer seja outro. Assim, é importante introduzir na definição da forma inicial do envelope outros elementos formais que permitam a elaboração de morfologias mais complexas. De modo a que seja possível também ao projetista estabelecer livremente as intenções arquitetónicas que pretenda para a definição da forma inicial do

envelope do edifício, tal como se refere no subcapítulo 4.3 (Metodologia) do Capítulo 4 da tese.

Tendo em conta os aspetos mencionados, pretende-se numa fase posterior de investigação efetuar os seguintes desenvolvimentos à Gramática do Envelope de Edifícios, de modo a que a mesma possa ser aplicada para o projeto do envelope de diferentes tipologias e programas de edifícios, para além da tipologia de moradia unifamiliar isolada:

→ Definir intervalos de valores dos parâmetros “Distâncias” e “Dimensões”, relativos ao lote e à forma inicial do envelope, que sejam adequados para diferentes programas de edifícios. Ou seja, se o programa do edifício em projeto for o de uma moradia unifamiliar isolada, os parâmetros “Distâncias” e “Dimensões” do lote e da forma inicial terão valores dentro de um intervalo de valores adequados, se o programa do edifício em projeto for o de um edifício de outro tipo, os parâmetros em questão terão valores dentro de outros intervalos;

→ Ampliar, no Grupo de Características do Programa, da gramática descritiva, os valores que a variável “Identificação”, relativas à “Tipologia”, pode assumir, de modo a que a Gramática do Envelope de Edifícios possa ser aplicada a outros programas de edifícios para além do programa de moradia unifamiliar isolada;

→ Ampliar, no Grupo de Características do Espaço Interior, da gramática descritiva, os valores que as variáveis “Função”, relativas aos “Espaços de Permanência”, podem assumir, de modo a que a Gramática do Envelope de Edifícios possa ser aplicada a outros programas de edifícios para além do programa de moradia unifamiliar isolada (e para além do programa de habitação);

→ Acrescentar, nas gramáticas de forma, na forma inicial do envelope do edifício, elementos formais que permitam a elaboração de morfologias complexas para a forma inicial do envelope do edifício.

## 5.3 Exemplos de aplicação da Gramática do Envelope de Edifícios

Com o objetivo de demonstrar quer o modo de funcionamento da Gramática do Envelope de Edifícios, quer a diversidade de soluções para o envelope que a gramática tem a capacidade de gerar, elaborou-se um conjunto de derivações da gramática, tendo como premissas:

- o contexto da localização geográfica de Lisboa, nomeadamente um lote urbano vago na freguesia de Belém;
- as formas iniciais de um lote retangular e de um envelope de edifício paralelepipedico para uma tipologia de moradia unifamiliar isolada.

As derivações seguem a lógica da Figura 5.6 (Etapas e operações de transformação da gramática do envelope de edifícios), aplicando sequencialmente as operações de transformação à forma do envelope do edifício, de modo a melhorar o seu desempenho energético, nomeadamente a sua capacidade de captar a irradiação incidente proveniente dos raios solares. A Figura 5.11 ilustra uma árvore de derivações, aplicando as quatro operações da gramática (Avaliação da Irradiação Incidente, Rotação, Normalização e Divisão) à forma inicial do envelope do edifício. A Figura 5.12 mostra uma imagem ampliada da ramificação superior da árvore de derivações e a Figura 5.13 mostra uma imagem ampliada da ramificação inferior da árvore de derivações.

A árvore de derivações elaborada apresenta derivações até um terceiro nível, ou seja, são aplicadas no máximo três operações de transformação (Rotação, Normalização, Divisão) à forma inicial do envelope do edifício, deixando-se em aberto as formas que podem ser geradas em níveis de derivação mais elevados.

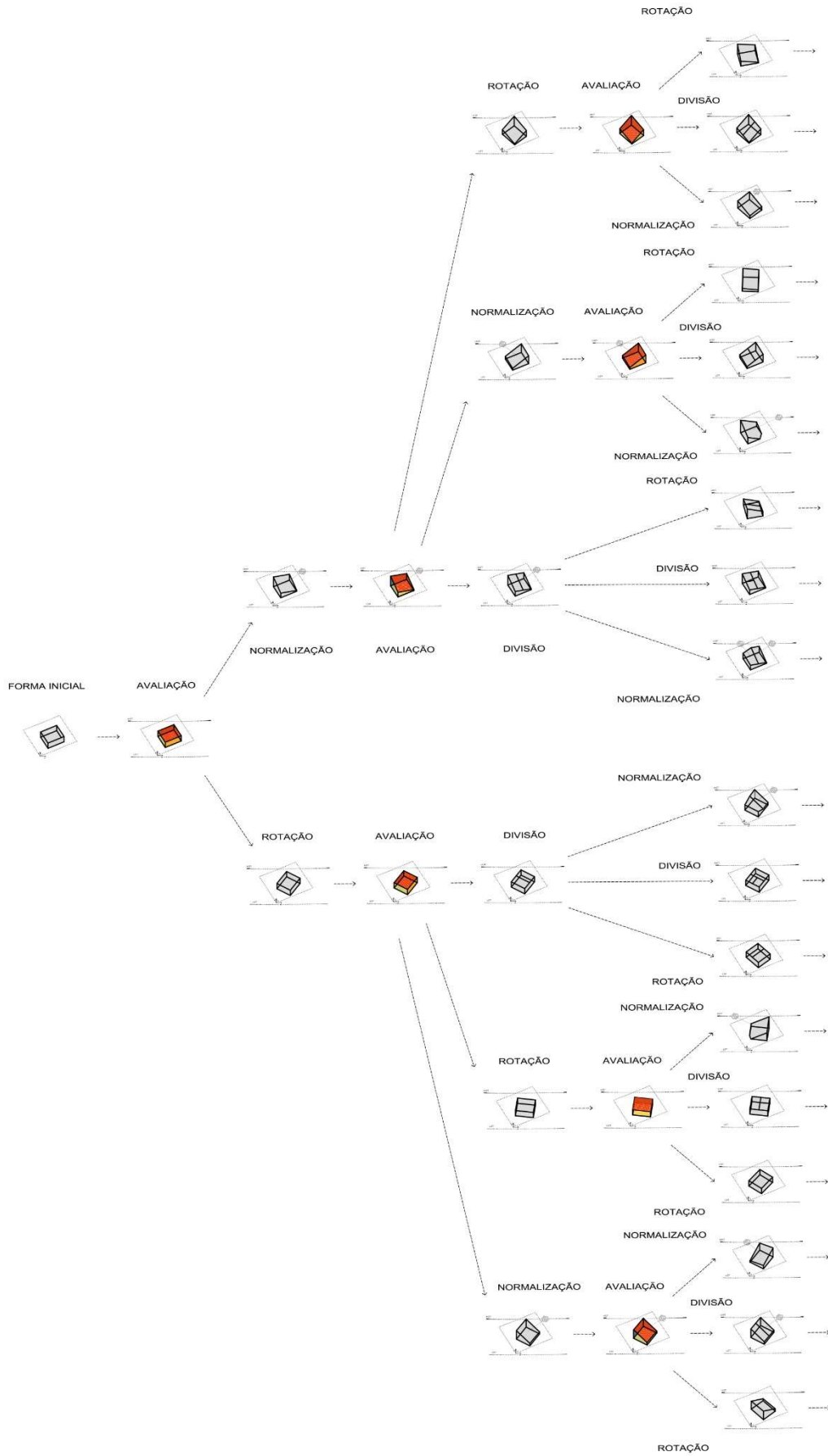


Figura 5.11 : Árvore de derivações da Gramática do Envelope de Edifícios.

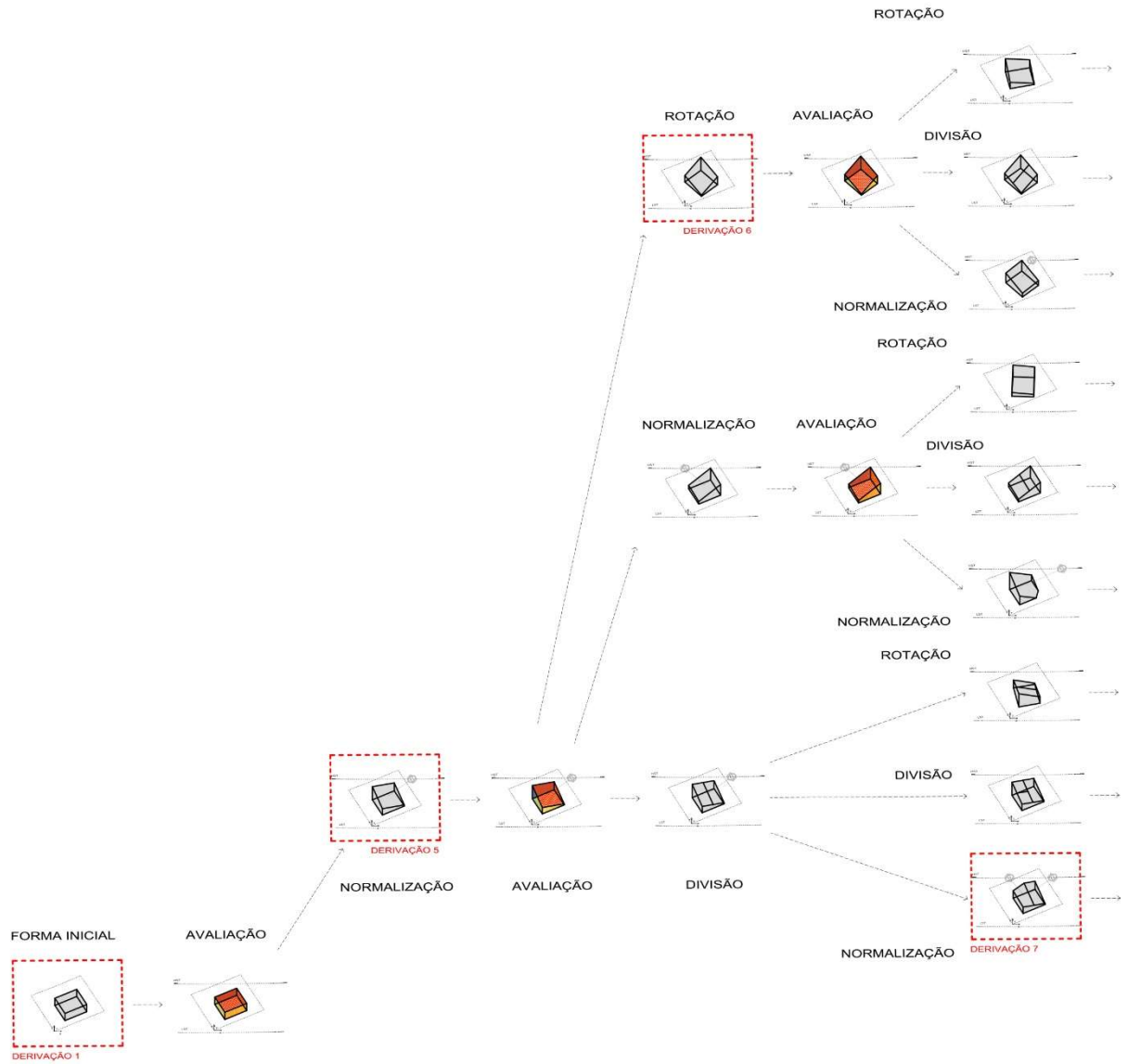


Figura 5.12 : Imagem ampliada da parte superior da ramificação da árvore de derivações.

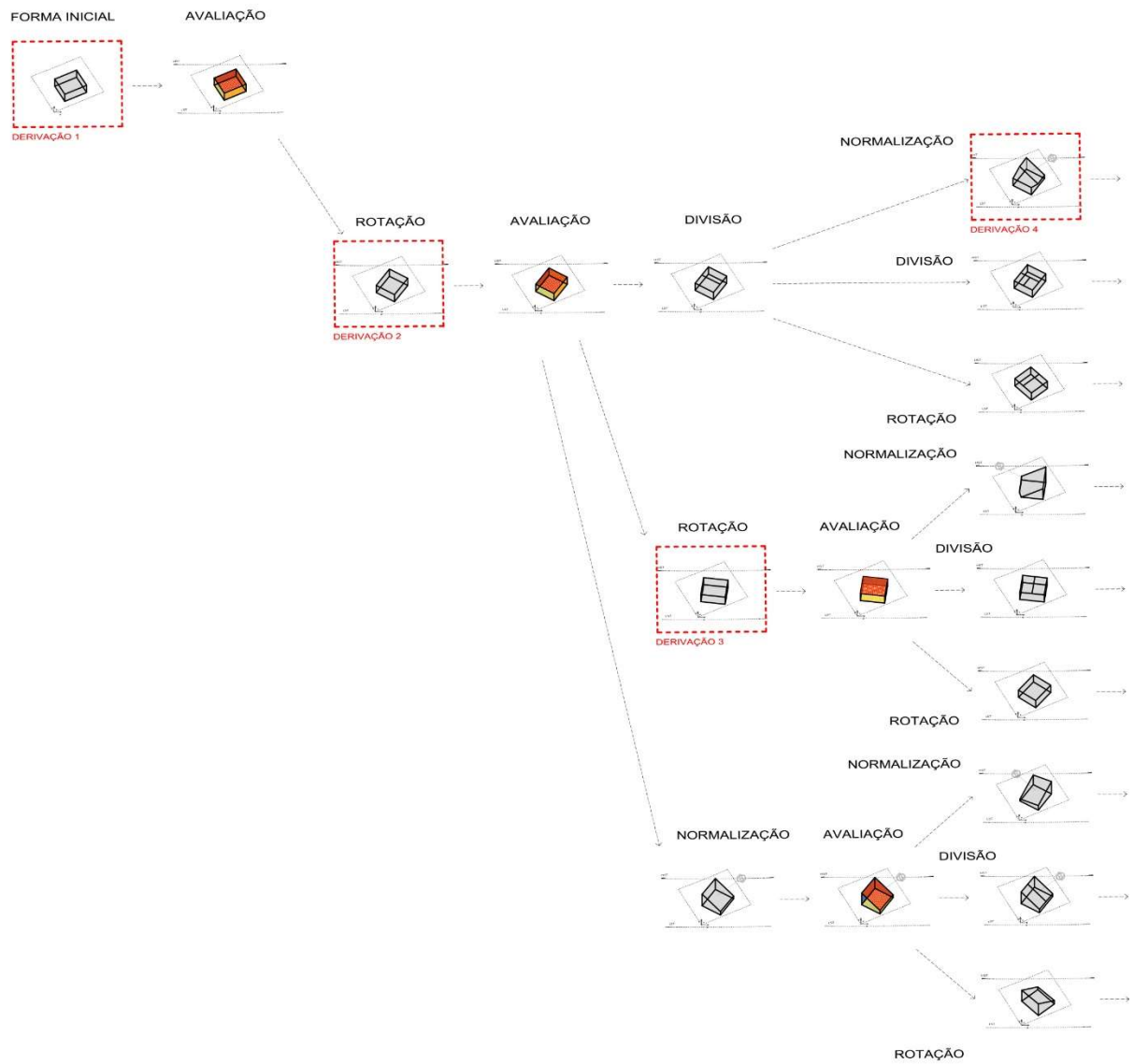


Figura 5.13 : Imagem ampliada da parte inferior da ramificação da árvore de derivações.

A Figura 5.14 indica o desempenho da forma, através da realização da operação de avaliação da irradiação solar incidente, de algumas das derivações presentes na árvore de derivações (aquelas que se encontram assinaladas a vermelho).

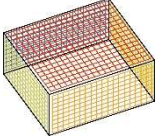
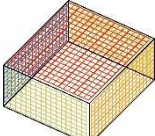
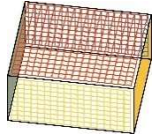
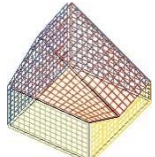
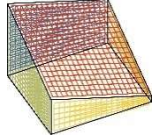
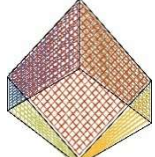
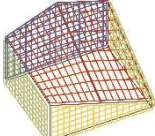
DERIVAÇÕES	DESEMPENHO
Derivação 1 	Irradiação Incidente por m <sup>2</sup> : 1041 kWh/m <sup>2</sup> Área das superfícies do envelope: 767 m <sup>2</sup> Irradiação Incidente Total: 798 447 kWh
Derivação 2 	Irradiação Incidente por m <sup>2</sup> : 1043 kWh/m <sup>2</sup> Área das superfícies do envelope: 767 m <sup>2</sup> Irradiação Incidente Total: 799 981 kWh
Derivação 3 	Irradiação Incidente por m <sup>2</sup> : 1036 kWh/m <sup>2</sup> Área das superfícies do envelope: 767 m <sup>2</sup> Irradiação Incidente Total: 794 612 kWh
Derivação 4 	Irradiação Incidente por m <sup>2</sup> : 1115 kWh/m <sup>2</sup> Área das superfícies do envelope: 806 m <sup>2</sup> Irradiação Incidente Total: 898 563 kWh
Derivação 5 	Irradiação Incidente por m <sup>2</sup> : 1068 kWh/m <sup>2</sup> Área das superfícies do envelope: 811 m <sup>2</sup> Irradiação Incidente Total: 866 148 kWh
Derivação 6 	Irradiação Incidente por m <sup>2</sup> : 1076 kWh/m <sup>2</sup> Área das superfícies do envelope: 811 m <sup>2</sup> Irradiação Incidente Total: 872 636 kWh
Derivação 7 	Irradiação Incidente por m <sup>2</sup> : 1149 kWh/m <sup>2</sup> Área das superfícies do envelope: 722 m <sup>2</sup> Irradiação Incidente Total: 829 852 kWh

Figura 5.14 : Exemplos de derivações da Gramática do Envelope de Edifícios, com o correspondente desempenho.

Foram selecionados exemplares das ramificações superior e inferior da árvore de derivações, em diferentes etapas de derivação. A Derivação 1 corresponde à forma inicial do envelope do edifício. As Derivações 2, 3 e 4 pertencem à ramificação inferior, enquanto que as Derivações 5, 6 e 7 encontram-se na ramificação superior.

A Derivação 2 é obtida através de uma rotação de  $30^\circ$  da forma inicial (Derivação 1) e a Derivação 3 através de uma rotação de  $145^\circ$  da forma inicial. A Derivação 4 apresenta uma normalização de metade da superfície da cobertura do envelope da Derivação 2, sendo a normalização efetuada para a posição do sol às 11h na sua trajetória do solstício de verão (trajetória que ocorre habitualmente no dia 21 de Junho).

A Derivação 5 consiste em uma normalização da superfície da cobertura do envelope da forma inicial (Derivação 1), com a normalização efetuada também para a posição do sol às 11h na sua trajetória do solstício de verão. A Derivação 6 obtém-se por meio de uma rotação de  $285^\circ$  da forma da Derivação 5. A Derivação 7 também é obtida através da Derivação 5, por meio de uma operação de normalização a metade da superfície da cobertura do envelope, para a posição do sol às 14h na sua trajetória do solstício de verão (dia 21 de Junho).

Importa salientar que a transformação que provoca o resultado da Derivação 4 resulta do facto de se efetuar a operação de normalização a apenas metade da superfície da cobertura da Derivação 2, a qual não havia sido submetida a nenhuma operação de normalização anterior. A transformação que provoca o resultado da Derivação 7 resulta do facto de se realizar a operação de normalização a metade da superfície, já por uma vez normalizada, da cobertura da Derivação 5. Em ambos os casos, o da Derivação 4 e o da Derivação 7, a operação de normalização a metade da superfície original provoca a criação de superfícies de dupla curvatura, as quais se constituem como parabolóides hiperbólicos.

No caso da Derivação 4, a superfície de dupla curvatura é obtida porque quando se efetua a normalização de apenas metade da superfície (a metade do lado

direito), a superfície resultante da normalização fica descontinuada da outra metade da superfície, a qual não foi normalizada (a metade do lado esquerdo). Ou seja, os pontos coincidentes com as extremidades da linha que divide a superfície total em duas superfícies, antes da operação de normalização a uma das metades da superfície, são coincidentes para ambas as metades da superfície. Após a operação de normalização a uma das metades da superfície, os pontos da metade da superfície que não foi normalizada permanecem na mesma posição, enquanto que os pontos da metade da superfície normalizada alteram a sua posição, deixando de ser coincidentes com os pontos da metade da superfície não normalizada. Para lidar com este facto e se obter uma superfície contínua, formada pelas duas metades, optou-se por fazer coincidir os pontos da metade da superfície que não foi normalizada, deslocando-os de modo a fazê-los coincidir com os pontos da metade da superfície que foi normalizada. Assim, a metade da superfície que não foi normalizada deixa de ser uma superfície plana, para se tornar uma superfície de dupla curvatura, pois dois dos seus pontos foram deslocados de modo a fazê-los coincidir com a metade da superfície que foi normalizada.

No caso da Derivação 7, o processo foi quase semelhante ao da Derivação 4. A diferença consiste em que na Derivação 7, a superfície da cobertura já havia sido alvo anteriormente de uma operação de normalização, à totalidade da sua superfície, na Derivação 5. E os pontos que são movidos são os pontos da metade da superfície que é normalizada na Derivação 7. No caso da Derivação 4, os pontos que foram movidos foram os pontos da superfície que não é normalizada. No caso da Derivação 7, optou-se por mover os pontos da superfície que é normalizada (a metade do lado esquerdo), transformando-a numa superfície de dupla curvatura, para verificar se deste modo também seria possível obter uma melhoria da irradiação solar incidente por  $m^2$  no envelope, o que se veio a confirmar, conforme se explica mais adiante.

Existe vantagem no facto de se realizarem operações de normalização a uma metade da cobertura (como é o caso da Derivação 4, que efetua uma normalização à metade direita da cobertura) ou a duas metades da cobertura (como é o caso da Derivação 7, que efetua uma normalização às duas metades

da cobertura). Em ambas as situações, a da Derivação 4 e a da Derivação 7, as duas metades da superfície total da cobertura obtêm exposições ao sol de intensidade variável, o que aumenta os valores da irradiação solar incidente por  $m^2$  no envelope.

Comparando o desempenho do envelope da Derivação 2, a qual não foi alvo de qualquer operação de normalização, com o desempenho após a Derivação 4, a qual efetua uma operação de normalização a uma metade da superfície total da cobertura do envelope, é possível constatar que:

- o valor da Irradiação Incidente por  $m^2$ , com a Derivação 4, aumenta de  $1043 \text{ kWh}/m^2$  para  $1115 \text{ kWh}/m^2$ ;
- o valor da Irradiação Incidente Total, com a Derivação 4, aumenta de  $799\,981 \text{ kWh}$  para  $898\,563 \text{ kWh}$ , e
- o valor da Área das Superfícies do Envelope, com a Derivação 4, aumenta de  $767 \text{ m}^2$  para  $806 \text{ m}^2$ .

Assim, no caso da Derivação 4, o desempenho do envelope aumenta, porque aumenta a eficiência da exposição das superfícies do envelope aos raios solares, e também porque aumenta a área total da superfície do envelope que é exposta aos raios solares.

Comparando o desempenho do envelope da Derivação 5, que foi alvo de uma operação de normalização, com o desempenho após a derivação 7, a qual efetua uma nova operação de normalização a metade da superfície total da cobertura do envelope, é possível constatar que:

- o valor da Irradiação Incidente por  $m^2$ , com a Derivação 7, aumenta de  $1068 \text{ kWh}/m^2$  para  $1149 \text{ kWh}/m^2$ ,
- o valor da Irradiação Incidente Total, com a Derivação 7, diminui de  $866\,148 \text{ kWh}$  para  $829\,852 \text{ kWh}$ , e
- o valor da Área das Superfícies do Envelope, com a Derivação 7, diminui de  $811 \text{ m}^2$  para  $722 \text{ m}^2$ .

Assim, apesar da eficiência da exposição das superfícies do envelope aos raios solares aumentar também no caso da Derivação 7, relativamente à Derivação 5, este aumento não é suficiente para compensar a diminuição da área da superfície exposta, o que resulta num valor da irradiação incidente total inferior na Derivação 7, relativamente à Derivação 5.

Da análise conjunta da Derivação 4 e da Derivação 7, é possível constatar que a eficiência da irradiação incidente por  $m^2$  aumenta com o aumento do número de operações de normalização. Tal poder-se-á dever ao facto de as duas metades da superfície da cobertura, ao serem orientadas em direções diferentes, provocarem uma maior exposição da cobertura total do envelope à radiação solar, durante a totalidade da trajetória solar ao longo do ano. É esta a vantagem de se efetuarem diferentes operações de normalização a diferentes metades da superfície total da cobertura.

Interessa também salientar que da verificação do desempenho energético da forma das diferentes derivações é possível constatar os seguintes fatores:

→ as duas principais operações de transformação (rotação e normalização) são válidas para melhorar o desempenho energético do envelope do edifício durante a fase de conceção do edifício, conforme se constata pela observação dos valores obtidos para a Irradiação Incidente por  $m^2$  e para a Irradiação Incidente Total;

→ a operação de rotação provoca um impacto inferior no desempenho energético do envelope, comparativamente à operação de normalização, no que diz respeito aos valores quer da Irradiação Incidente por  $m^2$ , quer da Irradiação Incidente Total. A Derivação 2 apresenta um ganho de 2 kWh/ $m^2$  e a Derivação 3 uma perda de 5 kWh/ $m^2$ , relativamente à forma inicial (Derivação 1). A Derivação 6 apresenta um ganho de 8 kWh/ $m^2$  relativamente à Derivação 5.

→ a operação de normalização provoca na generalidade maiores diferenças no desempenho energético do envelope do edifício. Permite na Derivação 4 um ganho de 72 kWh/ $m^2$ , aumentando em simultâneo a área

das superfícies do envelope e o valor da Irradiação Incidente Total, comparativamente à Derivação 2. Na Derivação 5 permite um ganho de 27 kWh/m<sup>2</sup> e também aumentos na área das superfícies do envelope e no valor da Irradiação Incidente Total, relativamente à forma inicial (Derivação 1). A Derivação 7, com uma segunda operação de normalização, apresenta ainda um ganho de 81 kWh/m<sup>2</sup> no desempenho energético, relativamente à Derivação 5, e de 108 kWh/m<sup>2</sup> relativamente à forma inicial (Derivação 1). No entanto, a Derivação 7 diminui a área das superfícies do envelope relativamente às Derivações 5 e 1, apresentando um valor significativamente mais elevado de Irradiação Incidente Total (829 852 kWh) do que a Derivação 1 (798 447 kWh), mas também significativamente inferior ao valor da Derivação 5 (866 148 kWh);

→ diferentes sequências das operações de rotação, normalização e divisão geram diferentes formas e desempenhos energéticos para o envelope do edifício. É por isso válida a exploração criativa de diferentes sequências de operações para a elaboração da forma do envelope do edifício, tendo como critérios o desempenho energético e as intenções estéticas do utilizador da gramática. A exploração criativa das diferentes operações de transformação pode ser feita através de um modo dito manual pelo utilizador, ou de um modo automático pelo computador (utilizando eventualmente processos de inteligência artificial).

## 5.4 Síntese do Capítulo

Estão definidos neste capítulo os aspetos que orientaram a conceção da Gramática do Envelope de Edifícios, assim como os elementos que compõem a gramática, nomeadamente as gramáticas de forma e a gramática descritiva. São também ilustrados alguns exemplos que demonstram o modo de aplicação da Gramática do Envelope de Edifícios, comprovando a sua validade enquanto instrumento criativo para a conceção de envelopes de edifícios com um eficiente desempenho energético. Podem ser inferidos neste capítulo os seguintes contributos para o conhecimento e para a prática da Arquitetura:

- A constituição de um instrumento conceptual para o Projeto Digital de Envelopes de Edifícios, a Gramática do Envelope de Edifícios, a qual permite o projeto de formas para o envelope dos edifícios que maximizem a capacidade de exposição dos envelopes à energia solar, com a finalidade de transformar a energia solar neles incidente em energia elétrica. Deste modo, contribui-se para a obtenção de um desempenho energético eficiente nos edifícios projetados, procurando-se que a geração de energia nos mesmos seja no mínimo equivalente à energia por estes consumida;
- O aperfeiçoamento de um modelo de gramática, a gramática genérica discursiva. O aperfeiçoamento em causa consiste em aplicar este modelo de gramática ao projeto de envelopes de edifícios, através da constituição da Gramática do Envelope de Edifícios. A gramática genérica discursiva do envelope de edifícios permite gerar e transformar um leque diversificado de formas para o envelope de edifícios, de acordo com o desempenho que as formas projetadas apresentam relativamente à irradiação solar incidente nos envelopes. A gramática pode ser utilizada para o projeto do envelope de diferentes tipologias de moradias unifamiliares isoladas, independentemente do seu contexto legal e ambiental, do seu programa e das características do seu espaço interior. Tal é possível de ser feito através da estrutura de gramáticas paralelas e através das operações e regras de transformação que são estabelecidas na Gramática do Envelope de Edifícios, as quais podem ser aplicadas a diversas formas iniciais que sejam definidas para o envelope de edifícios, desde que essas formas iniciais sejam compostas por superfícies planas retangulares.

A gramática completa desenvolvida para o envelope de edifícios é apresentada nos Anexos A5.1 a A5.32.

## 5.5 Referências do Capítulo 5

**Beirão, José.** 2012. "City Maker: Designing Grammars for Urban Design". PhD dissertation. Delft University of Technology, Faculty of Architecture, Delft, Netherlands.

**Beirão J., Duarte J.P.** 2018. "Generic grammars for design domains". *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing* 32: 225-239.

**Benrós, Deborah.** 2018. "A generic housing grammar for the generation of different housing languages. A generic housing shape grammar for Palladian villas, Prairie and Malagueira houses". PhD dissertation. University College London Bartlett School of Graduate Studies, London, United Kingdom.

**Castro e Costa, Eduardo.** 2018. "Managing complexity in mass customization through design space subdivision: a case study in ceramic tableware design". PhD dissertation. College of Arts and Architecture, The Graduate School, The Pennsylvania State University, Pennsylvania, United States of America.

**Duarte, José.** 2001. "Customizing Mass Housing: A Discursive Grammar for Siza's Malagueira Houses". PhD dissertation. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts, United States of America.

**Stiny, George.** 1981. "A note on the description of designs". *Environment and Planning B* 8: 257-267.



## **CAPÍTULO 6**

### **LIDIA: Protótipo de um software para suporte ao projeto digital de envelopes de edifícios**



## CAPÍTULO 6

# LIDIA: Protótipo de um software para suporte ao projeto digital de envelopes de edifícios

Neste capítulo descreve-se a elaboração de um protótipo de software, o “Languages Interface for the Development of Intelligent Algorithms”, com o acrónimo LIDIA. “Languages Interface for the Development of Intelligent Algorithms” significa em português “Interface de Linguagens para o Desenvolvimento de Algoritmos Inteligentes”. O protótipo LIDIA permite a realização do projeto digital de envelopes de edifícios e implementa a gramática do envelope de edifícios. Deste modo, o LIDIA serve como um instrumento prático de projeto, tal como a gramática serve como um instrumento conceptual, para o projeto digital de envelopes de edifícios. São descritos no presente capítulo os aspetos inerentes à conceção do LIDIA, os aspetos relacionados com o modo de implementação da gramática em linguagem de programação, bem como os fatores tidos em consideração na elaboração de um interface gráfico que permite estabelecer um modo de interação entre o LIDIA e o seu utilizador.

### 6.1 Conceção do LIDIA

O LIDIA tem um logótipo, o qual se apresenta na figura 6.1. O logótipo desenvolvido pretende revelar o carácter que se pretende para o LIDIA, ou seja, o de um protótipo de software que seja ágil e apelativo para a elaboração de



Figura 6.1 : Logótipo do protótipo LIDIA.

diferentes soluções formais para o envelope de edifícios, de modo a que estes alcancem um desempenho energético eficiente, no que se refere à irradiação solar incidente nos envelopes e à consequente capacidade de geração de energia elétrica nos mesmos. Daí a inserção de uma figura humana no logótipo, de modo a se ilustrar a capacidade de interação e a apelatividade que se pretende que o LIDIA tenha relativamente aos seres humanos, ou seja, relativamente aos seus utilizadores.

O objetivo do LIDIA é constituir um software, executado através do software Grasshopper (à semelhança de outros já existentes, como o Ladybug e o DIVA por exemplo), que sirva como um “interface”, sendo o termo “interface” utilizado entre aspas porque o mesmo não é visível para o utilizador mas sim uma característica invisível do programa, o qual permite o contacto e a utilização de diferentes linguagens, visando o desenvolvimento de algoritmos para a geração de formas para o envelope de edifícios que sejam eficientes na produção de energia elétrica. O LIDIA estabelece assim uma interação entre as linguagens do modelador de geometria Rhinoceros 3D, o editor de programação visual Grasshopper, o editor de programação textual Grasshopper Python Script Editor existente no Grasshopper, o software de cálculo da radiação solar Radiance, e um interface simplificado de utilizador elaborado especificamente para o LIDIA. O objetivo consiste em que possam ser geradas soluções formais para o envelope de edifícios, tendo em conta os dados do contexto do projeto para o edifício que está a ser projetado, dados esses que podem ser inseridos pelo projetista nos componentes do LIDIA elaborados para o Grasshopper, podendo também ser visualizados no interface simplificado de utilizador do LIDIA. As soluções formais para o envelope de edifícios são geradas através da elaboração de algoritmos realizados através dos componentes de programação visual feitos especificamente para o LIDIA, os quais se encontram no software Grasshopper e foram elaborados através de programação visual em Grasshopper e programação textual em Grasshopper Python Script Editor. As mesmas soluções formais para o envelope dos edifícios podem ser visualizadas no modelador de geometria Rhinoceros 3D e no interface simplificado de utilizador do LIDIA. É devido à interação que estabelece entre as linguagens do Rhinoceros 3D, do Grasshopper, do Grasshopper Python Script Editor, do

Radiance e do interface simplificado de utilizador do LIDIA, que se justifica a característica de “interface” e a designação de “Languages Interface”, em português “Interface de Linguagens”, do acrónimo LIDIA.

Os algoritmos desenvolvidos através do LIDIA podem ser elaborados atualmente de um modo manual pelo projetista, mas é intenção que possam também vir a ser desenvolvidos no futuro de um modo automático, através de processos de inteligência artificial, daí a designação do LIDIA por “Languages Interface for the Development of Intelligent Algorithms”, em que a característica “Development of Intelligent Algorithms” refere-se precisamente à utilização de inteligência, a humana e/ou a artificial, para o desenvolvimento de algoritmos. A investigação relatada na presente tese apresenta apenas algoritmos desenvolvidos manualmente pelo autor da tese, prevendo-se em investigação futura desenvolver um módulo de inteligência artificial que permita a elaboração de algoritmos de um modo automático, através do computador, para a geração de envelopes de edifícios, tendo em conta o contexto do projeto do envelope do edifício e o desempenho pretendido para o envelope no que se refere à sua exposição à irradiação solar incidente e à sua consequente capacidade de geração de energia elétrica.

Para a conceção do LIDIA, tiveram-se como princípios orientadores os seguintes fatores:

1 – a possibilidade de implementar e utilizar no LIDIA a gramática do envelope de edifícios, utilizando as diferentes fases e regras da gramática para a conceção de formas para o envelope de edifícios. Pretende-se que o utilizador possa, através do LIDIA, projetar formas para o envelope de edifícios, de modo a que as formas projetadas para o envelope tenham um desempenho eficiente no que diz respeito à irradiação solar incidente e à consequente capacidade de geração de energia elétrica;

2 – permitir modos diferentes de conceção, complementares entre si, para as formas do envelope de edifícios, nomeadamente:

- através da gramática do envelope de edifícios, aplicando as fases e as regras da gramática;
  - através da possibilidade de modelação manual de formas para o envelope de edifícios, nomeadamente para a forma inicial da gramática e para as formas resultantes da aplicação das fases e regras da gramática, adaptando o utilizador estas últimas de acordo com as suas intenções estéticas;
- 3 – possibilitar que a utilização da gramática do envelope de edifícios e a utilização do LIDIA sejam feitas de um modo interativo, apelativo e intuitivo para o utilizador.

A solução encontrada para a aplicação destes princípios orientadores consistiu em desenvolver um protótipo de software que se apresenta como um sistema de projeto misto (Figura 6.2).

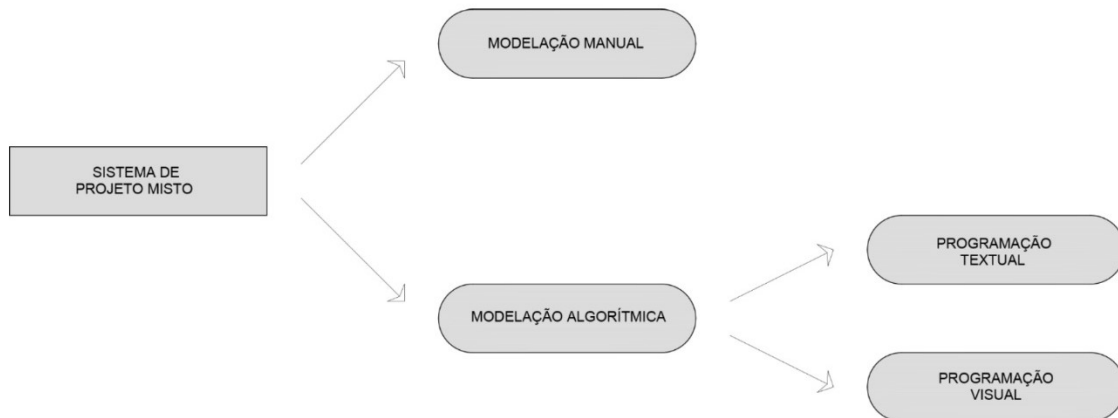


Figura 6.2 : Sistema de Projeto Misto proposto para o LIDIA.

O sistema de projeto misto proposto integra um modelo de Modelação Manual, o qual possibilita um modo de modelação manual, e um modelo de Modelação Algorítmica, o qual permite um modo de programação textual e um modo de programação visual. Interessa aqui diferenciar o modo de modelação manual dos modos de programação textual e visual: o modo de modelação manual, durante o processo de projeto, permite pensar e modelar a forma do envelope

do edifício em tempo real, através de uma interação direta entre o corpo do projetista e a forma do envelope que está a ser projetada. Os modos de programação textual e visual permitem pensar e modelar a forma do envelope “a priori”, antecipando através de um processo mental de abstração a solução ou as soluções formais para o envelope. Como tal, os modos de programação textual e visual proporcionam uma interação mais indireta, comparativamente ao modo de modelação manual, entre o projetista e a forma do envelope que está a ser projetada. Assim, é útil que aquando do projeto do envelope de um edifício, as soluções para a forma do envelope, obtidas através da aplicação dos modos de programação textual e visual, possam ser aperfeiçoadas e personalizadas através da aplicação do modo de modelação manual.

A presente tese, contudo, desenvolve apenas o modelo de Modelação Algorítmica (e os modos de programação textual e visual) no protótipo LIDIA, prevendo-se o desenvolvimento do modelo de Modelação Manual (e do modo de modelação manual) numa fase posterior de investigação sobre o projeto digital de envelopes de edifícios e sobre o projeto baseado em energia.

O sistema de projeto misto proposto utiliza também diferentes tipos de softwares, os quais servem de suporte e de base para a implementação do sistema de projeto misto e da gramática do envelope de edifícios. Foram utilizados os softwares indicados nos parágrafos a seguir, mas outros poderiam ser utilizados para a implementação do sistema de projeto misto e da gramática. Os diferentes tipos de softwares utilizados são os seguintes:

→ um modelador de geometria tridimensional, onde é possível modelar e visualizar todo o tipo de formas tridimensionais. A modelação pode ser feita quer de um modo manual, quer de um modo algorítmico. Para a demonstração do sistema de projeto misto proposto pela presente tese, escolheu-se utilizar o software de modelação Rhinoceros 3D;

→ um editor de linguagem de programação visual, onde é possível programar algoritmos através de componentes gráficos. É utilizado o software Grasshopper, programa que funciona no âmbito do software Rhinoceros 3D;

- um editor de linguagem de programação textual, onde se podem programar algoritmos através de caracteres alfanuméricos. É utilizado o software Grasshopper Python Script Editor, o qual funciona no âmbito do software Grasshopper;
- um programa de cálculo da radiação proveniente da luz solar, o qual permite calcular a irradiação solar incidente nas formas geradas para o envelope de edifícios. É utilizado o software Radiance, o qual é executado através do software Grasshopper Python Script Editor;
- um interface gráfico simplificado de utilizador, onde se pode interagir de um modo simples, apelativo e intuitivo com os algoritmos criados nos editores de programação visual e textual. É utilizada para a criação do interface gráfico simplificado o software Human User Interface (Human UI), o qual funciona no âmbito do software Grasshopper.

A Figura 6.3 ilustra os diferentes tipos de softwares utilizados pelos modelos de modelação do sistema de projeto misto, bem como as relações existentes entre os mesmos.

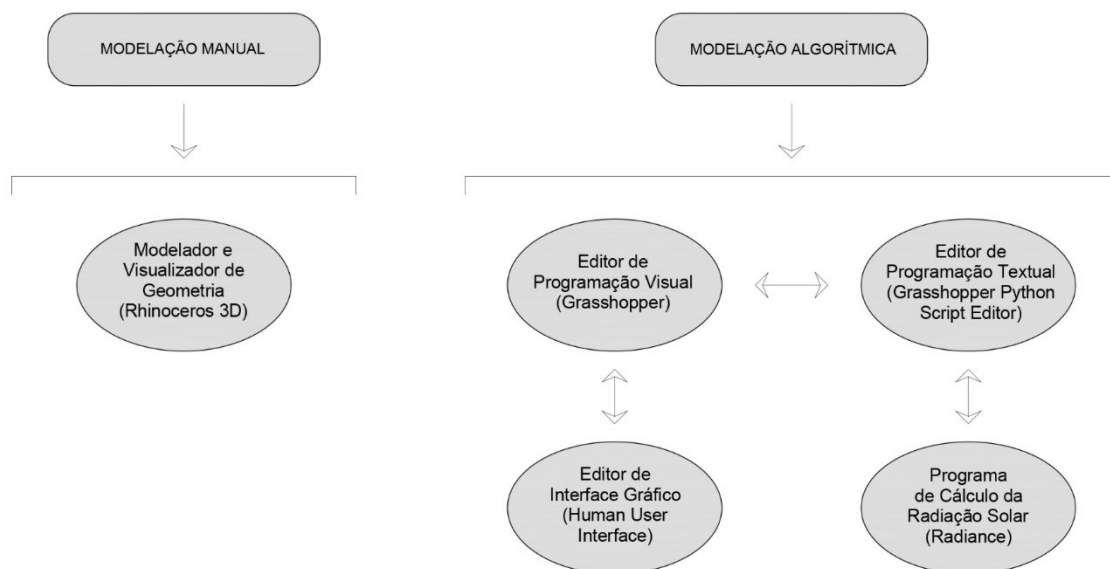


Figura 6.3 : Modelos de Modelação e Tipos de Softwares utilizados pelo Sistema de Projeto Misto proposto.

Conforme se pode verificar, o sistema de projeto misto em que se baseia o protótipo LIDIA permite ao utilizador modelar diretamente no programa de modelação geométrica (neste caso, o Rhinoceros 3D), ao mesmo tempo que permite programar de um modo visual no editor de programação visual (Grasshopper) e programar de um modo textual no editor de programação textual (Grasshopper Python Script Editor) algoritmos para a geração de formas para o envelope de edifícios. O editor de programação textual permite também aceder a um software de cálculo da radiação proveniente da luz solar (Radiance), para a avaliação da irradiação solar incidente nas formas geradas para o envelope dos edifícios. Já o editor de programação visual permite ainda aceder a um software de elaboração de interface gráficos (Human User Interface), de maneira a se poder elaborar um interface gráfico simplificado de utilizador, o qual possibilita aos projetistas explorar de um modo interativo, apelativo e intuitivo as soluções formais geradas para o envelope de edifícios. Soluções formais essas que são obtidas por meio dos algoritmos elaborados pelos projetistas no editor de programação visual Grasshopper, através dos componentes de programação visual feitos especificamente para o protótipo LIDIA.

Para a concretização do LIDIA e do sistema de projeto misto proposto, enquanto instrumento prático de projeto, foram definidas duas tarefas:

- 1 – a elaboração do LIDIA, recorrendo para tal à implementação da gramática do envelope de edifícios;
- 2 – a definição do modo de utilização do LIDIA, para o projeto digital de envelopes de edifícios.

Para a tarefa 1, a elaboração do LIDIA, utilizaram-se o editor de programação visual Grasshopper e o editor de programação textual Grasshopper Python Script Editor para a implementação da gramática do envelope de edifícios. A implementação da gramática do envelope de edifícios foi feita através da elaboração de componentes de programação visual, recorrendo para isso a componentes já existentes no editor de programação visual Grasshopper e a componentes elaborados de raiz através do editor de programação textual Grasshopper Python Script Editor. A descrição deste processo encontra-se na

secção 6.2, Implementação da Gramática do Envelope de Edifícios, do presente capítulo. Para a tarefa 2, a definição do modo de utilização do LIDIA para o projeto digital de envelopes de edifícios, foi estabelecido um modelo de interface gráfico para o LIDIA, o qual permite concretizar o sistema de projeto misto proposto. O modelo de interface gráfico em causa, onde estão presentes o modelador de geometria Rhinoceros 3D, o editor de programação visual Grasshopper e o editor de programação textual Grasshopper Python Script Editor, inclui também um interface gráfico simplificado de utilizador, elaborado especificamente para o LIDIA. A descrição da tarefa 2 encontra-se na secção 6.3, Interface Gráfico, do presente capítulo.

## 6.2 Implementação da Gramática do Envelope de Edifícios

O conteúdo essencial do LIDIA consiste na gramática do envelope de edifícios. Esta é implementada no LIDIA em componentes de programação visual elaborados especificamente para o Grasshopper, componentes esses que foram elaborados por meio de outros componentes de programação visual já existentes no Grasshopper e por meio de componentes de programação visual feitos através de programação textual no editor Grasshopper Python Script Editor. O conjunto de componentes de programação visual assim elaborados, os quais

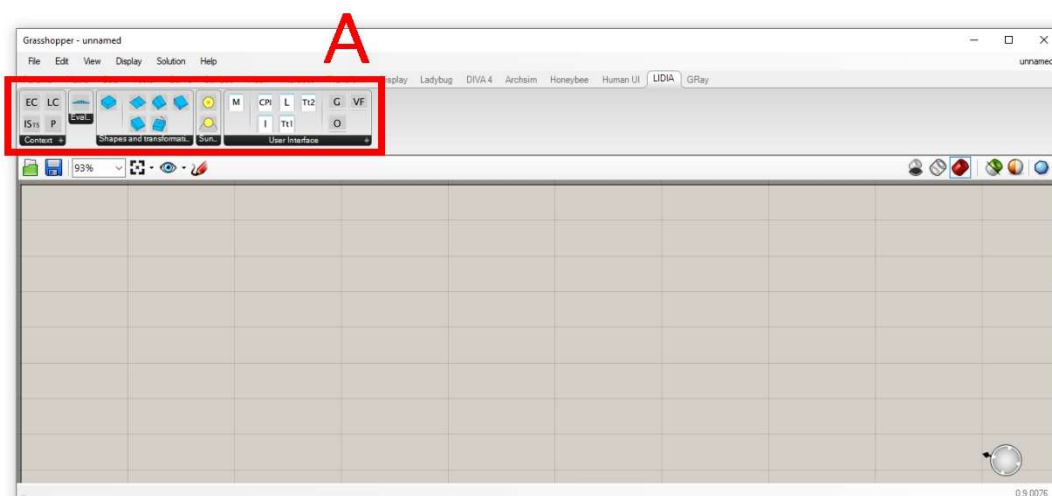


Figura 6.4 : Conjunto de componentes de programação visual do LIDIA, elaborados para o software Grasshopper, localizados na zona assinalada pela letra A.

implementam a gramática do envelope de edifícios, constituem os componentes de Grasshopper do LIDIA. A figura 6.4 ilustra o conjunto de componentes de Grasshopper do LIDIA. Através desse conjunto de componentes, é possível realizar diferentes algoritmos que geram e transformam a forma do envelope de edifícios. Os componentes em causa referem-se ao conjunto de operações e regras estabelecidas na gramática do envelope de edifícios. Referem-se também, para além disso, a componentes que permitem controlar a trajetória do sol, uma vez que a posição do sol é um fator essencial para a aplicação das operações e regras da gramática. A figura 6.5 mostra mais aproximadamente a barra de ferramentas elaborada para o LIDIA, identificando cada um dos componentes individuais que a compõem.

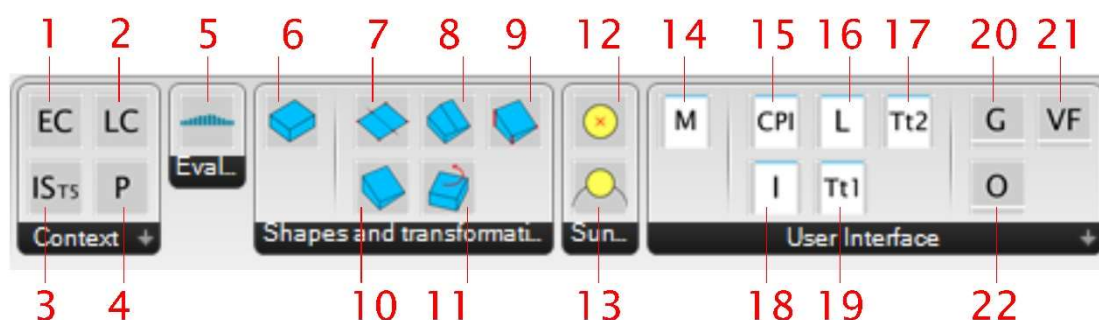


Figura 6.5 : Componentes de programação visual do LIDIA, elaborados para o software Grasshopper. 1 – Contexto Ambiental: Define o contexto ambiental para o projeto do edifício; 2 – Contexto Legal: Define o contexto legal para o projeto do edifício; 3 – Espaço Interior: Define o espaço interior para uma habitação de tipologia T5; 4 – Programa: Define o programa para um edifício; 5 – Avaliação: Avaliação da irradiação solar incidente no envelope e nas suas superfícies; 6 – Forma Inicial: Define a Forma Inicial para o envelope do edifício; 7 – Divisão; 8 – Define o envelope total do edifício, quando são aplicadas duas ou mais operações de normalização ao envelope; 9 – Normalização Seletiva; 10 – Normalização; 11 – Rotação; 12 – Seleção da Posição do Sol; 13 – Posições do Sol; 14 – Janela Principal; 15 – Janela do Contexto, Programa e Espaço Interior; 16 – Janela do Logótipo do LIDIA; 17 – Segundo conjunto de uma janela de transformação; 18 – Janela da Forma Inicial; 19 – Primeiro conjunto de uma janela de transformação; 20 – Atualização da geometria de uma janela de transformação; 21 – Filtro de seleção de valores; 22 – Atualização de opções de uma janela de transformação.

Os componentes individuais do LIDIA foram agrupados em cinco grupos principais, sendo esses grupos denominados de “Contexto”, “Avaliação”, “Formas e Regras de Transformação”, “Trajetória Solar” e “Interface de Utilizador”. Procede-se de seguida à descrição de cada um dos grupos e dos respetivos componentes que os compõem:

→ o grupo “**Contexto**”, o qual corresponde às regras d0, d1, d2, d3 e d4 da gramática descritiva da gramática do envelope de edifícios. Este grupo permite estabelecer o contexto em que o envelope do edifício é projetado, integrando os componentes do “Contexto Legal” (que define fatores como a área máxima de implantação e a área máxima bruta de construção), do “Contexto Ambiental” (que define fatores como a irradiação solar incidente pretendida para o envelope do edifício), do “Programa” (que estabelece a tipologia do edifício e a sua área bruta total) e do “Espaço Interior” (que estabelece características como a área e a forma dos espaços de circulação e dos espaços de permanência do edifício). Estes componentes correspondem aos componentes identificados com os números 1 a 4, indicados na figura 6.5;

→ o grupo “**Trajectoria Solar**” serve para definir a trajetória solar para a localização geográfica para onde o edifício está a ser projetado. É formado pelo componente das “Posições do Sol”, que indica as posições do sol ao longo do dia e do ano, para a localização geográfica para onde o edifício é projetado. É formado também pelo componente da “Seleção da Posição do Sol”, que permite selecionar uma posição pretendida do sol para efetuar operações de transformação ao envelope do edifício. Estes componentes correspondem aos componentes identificados com os números 12 e 13, indicados na figura 6.5;

→ o grupo “**Formas e Regras de Transformação**”, o qual permite definir a forma inicial e as regras de transformação de forma para o envelope de edifícios. Isso é conseguido através dos seguintes componentes:

- o componente da “**Forma Inicial**”, que corresponde à Forma Inicial do Lote e às regras 1, 2 e 3 da gramática do envelope de edifícios. Este componente permite definir a forma inicial para o lote e para o envelope do edifício. À forma inicial do envelope do edifício é possível aplicar as operações e as regras de transformação da gramática. O componente “Forma Inicial” encontra-se identificado com o número 6 na figura 6.5;
- o componente da “**Rotação**”, que corresponde às regras 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14 e 15 da gramática do envelope de edifícios. Permite rodar o

envelope do edifício ao longo de 360 graus, de modo a escolher a orientação mais favorável para o envelope do edifício, de acordo com os valores da irradiação solar incidente sobre o envelope. Este componente encontra-se identificado com o número 11, na figura 6.5;

- o componente da **“Normalização”**, que corresponde às regras 16, 17, 18, 19, 20 e 21 da gramática do envelope de edifícios. Este componente efetua a operação de normalização sobre o envelope do edifício, transformando uma ou mais superfícies do envelope em superfícies perpendiculares a posições do sol ao longo da sua trajetória anual e diária. As posições do sol são escolhidas atualmente pelo utilizador de um modo manual, mas pretende-se que também possam vir a ser escolhidas futuramente de um modo automático através do computador. Os critérios de escolha para as posições do sol que servem como referência para a operação de normalização são os valores de irradiação incidente obtidos para o envelope do edifício, bem como a estética resultante da operação de normalização sobre a forma do envelope do edifício. O componente **“Normalização”** encontra-se identificado com o número 10 na figura 6.5;

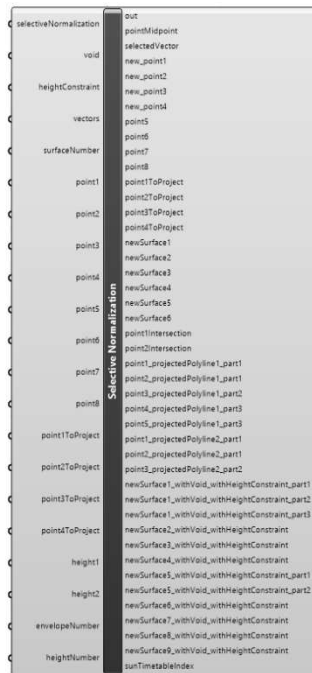
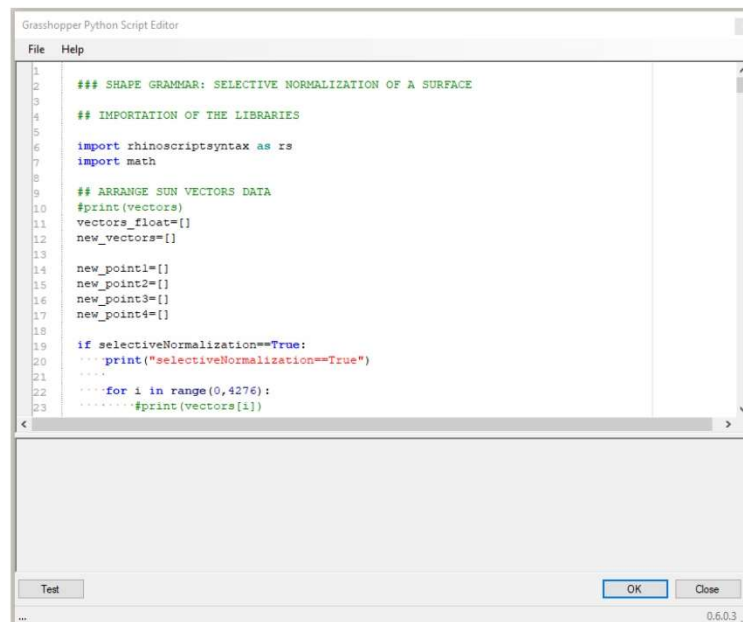


Figura 6.6 : Exemplo de Componente feito para o Grasshopper: Componente “Normalização Seletiva”.

• o componente da **“Normalização Seletiva”**, ilustrado na figura 6.6, que permite a constituição de um conjunto de soluções de forma para o envelope de edifícios, conjunto esse que constitui apenas uma parte do conjunto de soluções que podem ser obtidas através do componente anterior, o da **“Normalização”**. O conjunto de soluções de forma obtidas através do componente **“Normalização Seletiva”** são geradas através da indicação de requisitos mínimos de altura para o pé-direito do edifício, o que provoca uma seleção de formas normalizadas para o envelope que cumpram com os requisitos mínimos de pé-direito indicados. Como tal, tendo em conta o requisito mínimo de pé-direito, o conjunto de formas geradas através do componente **“Normalização Seletiva”** constitui uma parte e um subconjunto do conjunto de formas que podem ser geradas através do componente de **“Normalização”**. O componente **“Normalização Seletiva”** encontra-se identificado com o número 9 na figura 6.5. A figura 6.7 ilustra um exemplo de código editado em Grasshopper Python Script Editor para este componente;



```
Grasshopper Python Script Editor
File Help
1
2  ### SHAPE GRAMMAR: SELECTIVE NORMALIZATION OF A SURFACE
3
4  ## IMPORTATION OF THE LIBRARIES
5
6  import rhinoscriptsyntax as rs
7  import math
8
9  ## ARRANGE SUN VECTORS DATA
10 #print(vectors)
11 vectors_float=[]
12 new_vectors=[]
13
14 new_point1=[]
15 new_point2=[]
16 new_point3=[]
17 new_point4=[]
18
19 if selectiveNormalization==True:
20     #print("selectiveNormalization==True")
21     ...
22     #for i in range(0,4276):
23         #print(vectors[i])
...
Test OK Close
0.6.0.3
```

Figura 6.7 : Exemplo de código editado em Grasshopper Python Script Editor para o Componente **“Normalização Seletiva”**.

• o componente **“Envelope Total”**, que possibilita a formação do envelope total de um edifício, quando são aplicadas duas ou mais

operações de normalização às superfícies do envelope de um edifício. Quando são aplicadas duas ou mais operações de normalização, as superfícies do envelope são subdivididas, pelo que é necessário o componente “Envelope Total” para que as superfícies subdivididas se voltem a unir como superfícies únicas que constituem o envelope total de um edifício. Este componente encontra-se identificado com o número 8 na figura 6.5;

- o componente “**Divisão**”, que corresponde às regras 22, 23, 24 e 25 da gramática do envelope de edifícios. O componente “**Divisão**” permite a divisão de uma ou mais superfícies retangulares do envelope do edifício em duas superfícies retangulares semelhantes. Este componente encontra-se identificado com o número 7 na figura 6.5;

→ o grupo “**Avaliação**”, que possibilita avaliar a irradiação solar incidente sobre o envelope de um edifício, para a totalidade das suas superfícies e para cada superfície individualmente. Este grupo é formado pelo componente “**Avaliação**”, o qual se encontra identificado com o número 5 na figura 6.5;

→ o grupo “**Interface de Utilizador**”, que permite a elaboração de um interface simplificado de utilizador, específico do protótipo LIDIA, onde é possível efetuar, visualizar e avaliar as transformações de forma ao envelope do edifício em projeto, de um modo interativo, apelativo e intuitivo. É composto pelos seguintes componentes:

- o componente “**Janela Principal**”, que possibilita formar a janela principal do LIDIA. Encontra-se identificado com o número 14 na figura 6.5;

- o componente “**Janela do Logótipo do LIDIA**”, que elabora uma janela com o logótipo do protótipo LIDIA, inserida dentro da janela principal do LIDIA. Encontra-se identificado com o número 16 na figura 6.5;

- o componente “**Janela do Contexto, Programa e Espaço Interior**”, que permite formar uma janela com o contexto, o programa e o espaço interior do edifício em projeto, janela essa que é inserida dentro da janela

principal do LIDIA. Encontra-se identificado com o número 15 na figura 6.5;

- o componente “**Janela da Forma Inicial**”, que elabora uma janela com a forma inicial do envelope do edifício, onde é possível também proceder à avaliação da irradiação solar incidente sobre o envelope do edifício. Encontra-se identificado com o número 18 na figura 6.5;

- o componente “**Primeiro conjunto de uma Janela de Transformação**”, que permite elaborar o primeiro conjunto de elementos que formam uma janela onde é possível efetuar transformações de forma ao envelope do edifício em projeto. Encontra-se identificado com o número 19 na figura 6.5;

- o componente “**Segundo conjunto de uma Janela de Transformação**”, que possibilita elaborar o segundo conjunto de elementos que formam uma janela onde é possível efetuar transformações de forma ao envelope do edifício em projeto. Encontra-se identificado com o número 17 na figura 6.5;

- o componente “**Atualização da Geometria de uma Janela de Transformação**”, que permite atualizar a geometria presente em uma janela de transformação, de acordo com as opções tomadas pelo utilizador do interface. Este componente encontra-se identificado com o número 20 na figura 6.5;

- o componente “**Filtro de seleção de valores**”, que permite registar as opções que são tomadas pelo utilizador nas janelas de transformação de forma e ativar, se for essa a opção tomada pelo utilizador, a avaliação das formas presentes na janela de transformação. Este componente encontra-se identificado com o número 21 na figura 6.5;

- o componente “**Atualização de opções de uma Janela de Transformação**”, que permite atualizar as opções de transformação de forma em uma janela de transformação. Ou seja, consoante a forma que é escolhida pelo utilizador para ser transformada, este componente permite atualizar as operações de transformação de forma que são

possíveis de ser aplicadas à forma que se pretende que seja transformada. Este componente encontra-se identificado com o número 22 na figura 6.5.

O LIDIA e o seu conjunto de grupos e componentes, elaborados para o Grasshopper, foram feitos com o objetivo de permitirem desenvolver algumas das fases propostas para o Projeto Digital de Envelopes de Edifícios, definidas no capítulo 4 da tese: a Fase A – Definir Contexto (Contexto Legal e Contexto Ambiental), Programa e Espaço Interior do edifício, a Fase B – Definir Forma Inicial do Envelope do Edifício, a Fase C – Definir Orientação do Edifício e a Fase D – Definir Forma Final do Envelope do Edifício, são as fases que podem ser desenvolvidas com os grupos e componentes atuais do LIDIA. Numa fase posterior de investigação, pretende-se elaborar os grupos e componentes do LIDIA que permitem desenvolver as restantes fases do Projeto Digital de Envelopes de Edifícios: a Fase E – Definir Zonas Opacas, Zonas Não Opacas e Outras Zonas, a Fase F – Definir Zonas de Geração de Energia, e a Fase G – Definir Estrutura e Materiais de Construção.

### **6.3 Interface Gráfico**

Para a utilização do LIDIA, no âmbito do Projeto Digital de Envelopes de Edifícios, foi estabelecido um modelo de interface gráfico, o qual permite concretizar o sistema de projeto misto proposto no subcapítulo 6.1 (Conceção do LIDIA), sistema esse que é composto por um modelo de modelação manual e por um modelo de modelação algorítmica. O modelo de interface gráfico elaborado integra o modelador de geometria Rhinoceros 3D (o qual permite o modelo de modelação manual), o editor de programação visual Grasshopper e o editor de programação textual Grasshopper Python Script Editor (os quais permitem o modelo de modelação algorítmica), e inclui também um interface gráfico simplificado de utilizador, elaborado especificamente para o LIDIA. O interface gráfico simplificado de utilizador permite aos projetistas explorar de um modo interativo, apelativo e intuitivo as soluções formais geradas para o envelope de edifícios, as quais são obtidas pelos algoritmos elaborados pelos

próprios projetistas no editor de programação visual Grasshopper, através dos componentes de programação visual específicos do LIDIA.

O modelo de interface gráfico que permite a utilização do LIDIA prevê assim a utilização de quatro janelas, sendo elas:

- 1 – uma janela de um programa de modelação geométrica, neste caso o Rhinoceros 3D;
- 2 – uma janela de um programa de programação visual, neste caso o Grasshopper;
- 3 – uma janela de um programa de programação textual, neste caso o Grasshopper Python Script Editor;
- 4 – uma janela de um interface gráfico simplificado de utilizador, neste caso o interface elaborado especificamente para o protótipo LIDIA.

Para a elaboração de componentes de programação visual específicos para o LIDIA, o modelo de interface gráfico prevê a utilização de três janelas em

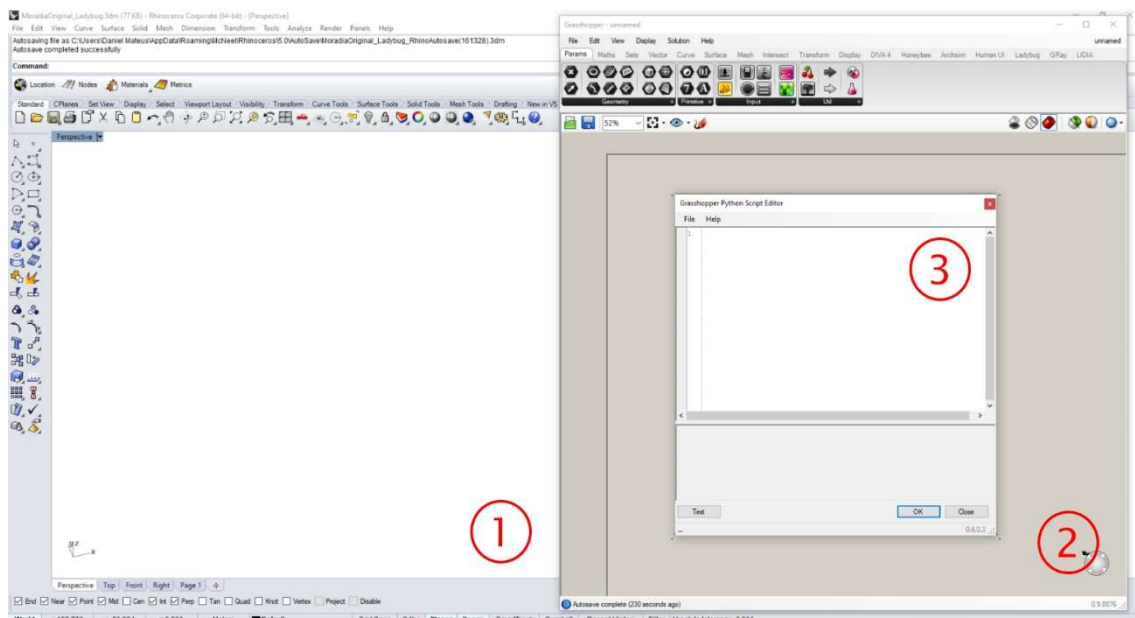


Figura 6.8 : Modelo de interface gráfico para a elaboração de componentes de programação visual específicos para o LIDIA (1: software Rhinoceros 3D, 2: software Grasshopper, 3: software Grasshopper Python Script Editor).

simultâneo: a janela do software Rhinoceros 3D, a janela do software Grasshopper e a janela do software Grasshopper Python Script Editor, conforme se pode visualizar na figura 6.8.

Os componentes de programação visual específicos para o LIDIA são programados textualmente na janela do Grasshopper Python Script Editor e programados visualmente na janela do software Grasshopper, podendo ser visualizado o seu resultado geométrico no software Rhinoceros 3D.

Para a elaboração de algoritmos que gerem formas para o envelope de edifícios, com desempenho energético eficiente no que se refere à irradiação solar incidente no envelope, o modelo de interface gráfico proposto para a utilização do LIDIA prevê ainda a utilização de três janelas: a janela do software Rhinoceros 3D, a janela do software Grasshopper e a janela do interface simplificado de utilizador específico do LIDIA, conforme se pode visualizar na figura 6.9.

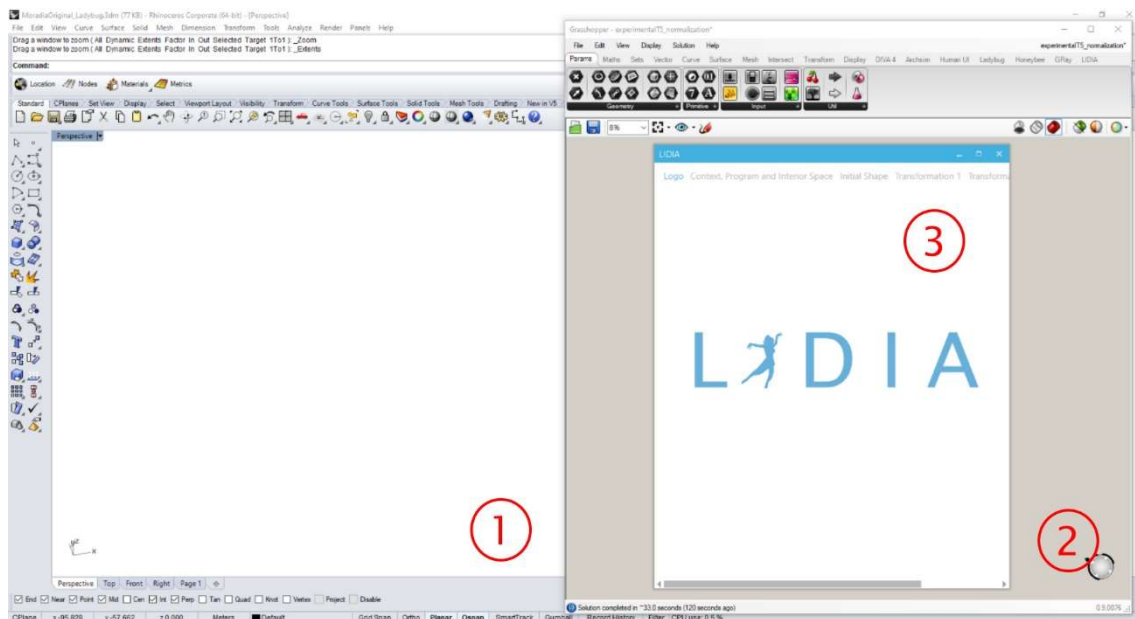


Figura 6.9 : Modelo de interface gráfico para a utilização do LIDIA (1: software Rhinoceros 3D, 2: software Grasshopper, 3: interface simplificado de utilizador do LIDIA).

Os algoritmos são elaborados por meio dos componentes de programação visual específicos do LIDIA, no software Grasshopper, podendo os seus resultados ser visualizados no software Rhinoceros 3D e no interface simplificado de utilizador do LIDIA. O interface de utilizador do LIDIA apresenta a vantagem, face ao

software Rhinoceros 3D, de permitir explorar de um modo mais fácil, interativo e apelativo as diferentes possibilidades formais que os algoritmos elaborados no Grasshopper permitem. É possível também através do interface de utilizador do LIDIA comparar facilmente o desempenho energético das diferentes formas geradas pelos algoritmos, no que se refere à irradiação solar incidente no envelope e à estimativa de energia elétrica gerada no envelope.

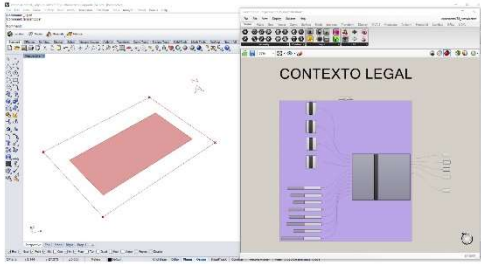
O interface de utilizador do LIDIA permite assim uma boa visualização e comparação das diferentes formas geradas para o envelope de edifícios, e do seu respetivo desempenho, funcionando como um elemento que permite o trabalho colaborativo entre o Rhinoceros 3D, o Grasshopper e o próprio interface de utilizador. O interface de utilizador do LIDIA não funciona por isso, pelo menos atualmente, como um interface independente, que permite por si só o projeto digital de envelopes de edifícios.

Descreve-se de seguida o modo de utilização previsto para o LIDIA, no âmbito do projeto digital de envelopes de edifícios. O fluxo de trabalho previsto, visível na figura 6.10, é o seguinte:

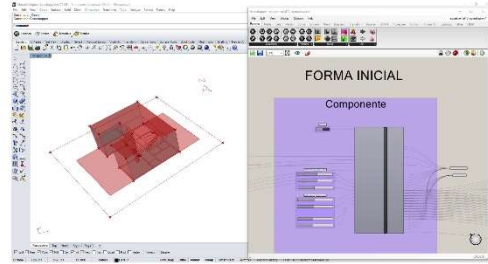
**1 – Definição do Contexto:** nesta primeira etapa, é definido o contexto do projeto, sendo estabelecidos os elementos relativos ao Contexto Legal, ao Contexto Ambiental, ao Programa e ao Espaço Interior do edifício. Isso é feito inserindo os dados relativos a esses elementos nos respetivos componentes do LIDIA, feitos para o software Grasshopper. Tais componentes correspondem aos componentes com os números 1, 2, 3 e 4, ilustrados na figura 6.5;

**2 – Definição da Forma Inicial:** após definido o contexto do projeto, é possível proceder à definição da forma inicial para o envelope do edifício em projeto. A forma inicial definida para o envelope tem em consideração, e é constringida, pelos elementos que foram definidos para o contexto. O componente do LIDIA que define a forma inicial corresponde ao componente identificado com o número 6 na figura 6.5;

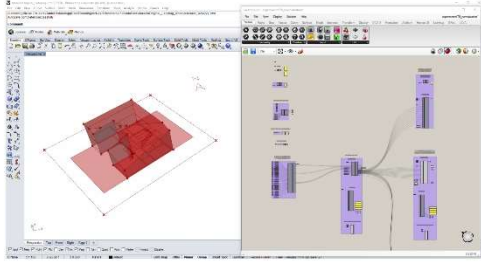
1-Definição do Contexto



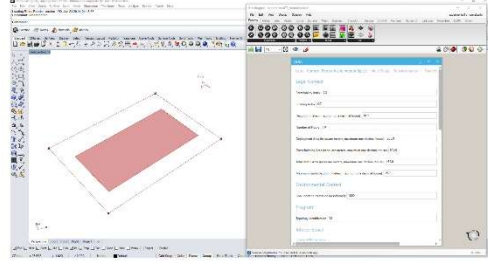
2-Definição da Forma Inicial



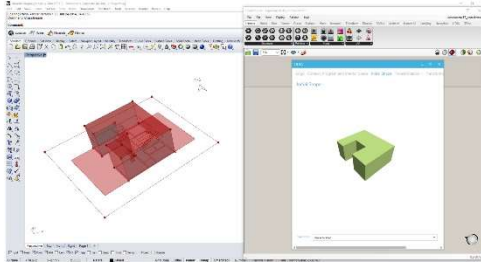
3-Elaboração de algoritmos



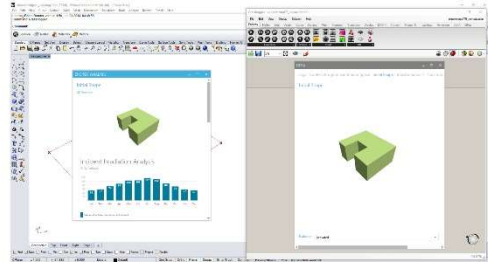
4-Visualização do Contexto no LIDIA



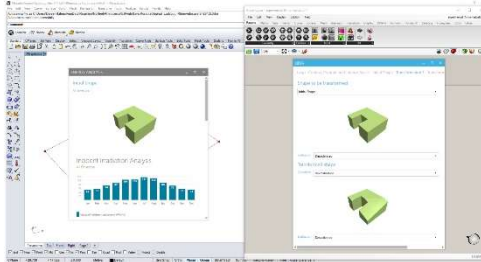
5-Visualização da Forma Inicial no LIDIA



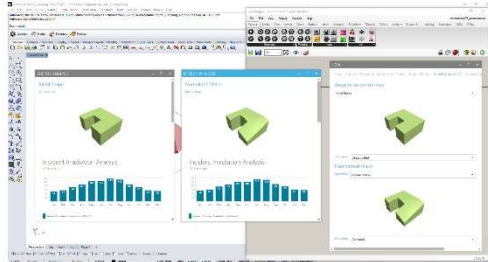
6-Análise de irradiação no LIDIA



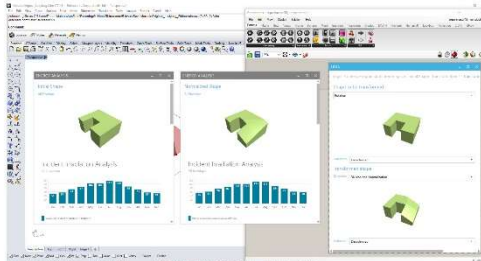
7-Transformação de forma no LIDIA



8-Nova Análise de irradiação no LIDIA



9-Nova transformação de forma no LIDIA



10-Nova Análise de irradiação no LIDIA

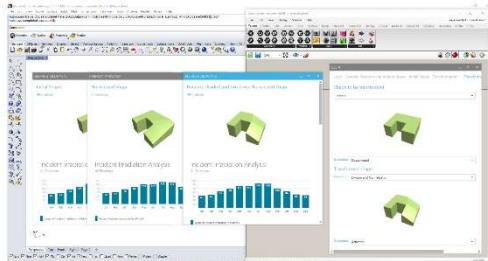


Figura 6.10 : Fluxo de trabalho previsto para a utilização do LIDIA.

**3 – Elaboração de algoritmos:** definidos o contexto do projeto e a forma inicial do envelope do edifício, avança-se para a elaboração de algoritmos, aplicando-se as operações de rotação, normalização e divisão, em diferentes sequências, de acordo com as intenções do projetista. Os algoritmos são realizados no software Grasshopper com os componentes do LIDIA, sendo a forma projetada para os envelopes visível no software Rhinoceros 3D. Os componentes do LIDIA que dizem respeito às operações de rotação, normalização e divisão encontram-se identificados com os números 7 a 11, na figura 6.5;

**4 – Visualização do Contexto no LIDIA:** elaborados os algoritmos, é possível visualizar as soluções que esses mesmos algoritmos permitem gerar para a forma do envelope de edifícios, no interface simplificado de utilizador do LIDIA. O interface simplificado de utilizador do LIDIA, ativado a partir do componente “Janela Principal”, identificado com o número 14 na figura 6.5, permite visualizar e avaliar de um modo mais interativo, apelativo e intuitivo, quando comparado com o software Rhinoceros 3D, as soluções de forma geradas para o envelope de edifícios. O interface é composto por várias páginas, sendo a primeira página destinada à visualização do contexto do projeto, que diz respeito aos dados relativos ao Contexto Legal, ao Contexto Ambiental, ao Programa e ao Espaço Interior, os quais foram inseridos previamente nos componentes de Grasshopper do LIDIA;

**5 – Visualização da Forma Inicial no LIDIA:** após a visualização do contexto na primeira página do interface, é possível visualizar na segunda página do interface a forma inicial para o envelope do edifício em projeto. O componente do LIDIA que se refere à forma inicial do envelope encontra-se numerado com o número 18 na figura 6.5;

**6 – Análise da irradiação no LIDIA:** nesta etapa é possível avaliar a irradiação solar incidente na forma inicial definida para o envelope do edifício. Para além da irradiação solar incidente, é possível visualizar uma estimativa da energia elétrica gerada no envelope e uma estimativa do consumo de energia elétrica expectável para o edifício em projeto. O

componente do LIDIA relativo à análise da irradiação incidente encontra-se identificado com o número 5 na figura 6.5;

**7 – Transformação de forma no LIDIA:** à forma inicial definida para o envelope do edifício é possível aplicarem-se as regras de transformação de forma definidas pelos algoritmos programados no Grasshopper, regras essas que se referem às operações de rotação, normalização e divisão. A aplicação dessas regras é feita numa página designada como página de “Transformação”. O número de páginas de transformação, para a definição da forma do envelope do edifício, são aquelas que o projetista e utilizador do interface pretender. Os componentes do LIDIA relativos à adição de uma página de “Transformação” no interface encontram-se identificados com os números 17, 19, 20, 21 e 22, na figura 6.5;

**8 – Nova Análise de irradiação no LIDIA:** esta etapa é semelhante à etapa 6, sendo feita uma análise da irradiação solar incidente sobre o envelope do edifício. É possível comparar o resultado da análise obtida sobre o envelope da forma transformada, relativamente à forma inicial e/ou outra forma projetada para o envelope do edifício em projeto;

**9 – Nova transformação de forma no LIDIA:** a partir desta etapa podem ser aplicadas, em novas páginas de “Transformação”, as operações de transformação de forma que o projetista pretender, desde que essas operações de transformação de forma estejam previamente definidas nos algoritmos programados visualmente em Grasshopper;

**10 – Nova Análise de irradiação no LIDIA:** a qualquer nova transformação de forma que seja feita ao envelope do edifício em projeto, pode ser realizada uma nova análise da irradiação solar incidente. A análise da forma transformada pode ser comparada com a análise das outras formas obtidas durante transformações anteriores, incluindo a própria forma inicial. Deste modo, o processo de projeto pode-se desenvolver progressivamente, podendo o projetista aplicar o número de transformações de forma que pretender, desde que essas transformações estejam definidas nos algoritmos elaborados no software Grasshopper. Às formas assim geradas, pode ser realizada a análise da irradiação solar

incidente, onde é incluída também uma estimativa da geração de energia elétrica e uma estimativa do consumo de energia elétrica. Assim, o projetista pode usufruir de um processo de projeto para o envelope de edifícios, em que o processo de geração de forma se baseia no desempenho da irradiação solar incidente nos envelopes, juntando-se a este aspeto o critério das opções estéticas e arquitetónicas do projetista, uma vez que este pode optar por diferentes sequências de operações de transformação de forma para atingir formas de envelopes com um desempenho eficiente. É possível elaborarem-se diferentes formas para o envelope de edifícios, obtidas através de diferentes sequências de operações de transformação, alcançando todas essas formas um desempenho eficiente no que se refere à irradiação solar incidente no envelope.

Conforme se constata, o interface simplificado de utilizador do LIDIA permite proporcionar uma melhor interação entre o projetista e o sistema de projeto para o envelope de edifícios. Permite explorar e avaliar de um modo mais rápido, apelativo e intuitivo, diferentes soluções formais para o envelope de edifícios. Com o objetivo de que tais soluções formais apresentem um bom desempenho no que se refere à irradiação solar incidente no envelope, de modo a que a estimativa de energia elétrica gerada seja superior à estimativa de energia elétrica consumida no edifício. Descrevendo em maior detalhe o interface simplificado de utilizador do LIDIA, este encontra-se organizado do seguinte modo:

→ é composto por diferentes páginas, em que a página inicial constitui uma página de apresentação do interface do LIDIA, contendo o logótipo do mesmo. A primeira página que apresenta dados relativos ao projeto do envelope do edifício é a página do “Contexto, Programa e Espaço Interior”, a qual aplica a gramática descritiva da gramática do envelope de edifícios, cujo conteúdo se encontra presente nos componentes de Grasshopper do LIDIA designados por “Contexto Legal”, “Contexto Ambiental”, “Programa” e “Espaço Interior”. As páginas seguintes do interface do LIDIA referem-se à página da “Forma Inicial” e às páginas de “Transformação”, as quais aplicam as gramáticas de forma da gramática do envelope de edifícios,

cujo conteúdo se encontra presente nos componentes de Grasshopper do LIDIA relativos à forma inicial e às operações de rotação, normalização e divisão. Importa salientar de novo que as páginas de “Transformação” podem ser aquelas que o projetista pretender, sendo o seu número determinado pelo número de transformações que o projetista quiser efetuar sobre a forma do envelope do edifício em projeto. É contudo necessário que as operações de transformação de forma sejam primeiro definidas nos componentes de Grasshopper do LIDIA, para que possam ser depois executadas nas páginas de “Transformação” do interface do LIDIA;

The screenshot shows the LIDIA software interface with the following sections and input fields:

- Legal Context**
  - Permeability Index: 0.3
  - Building Index: 0.7
  - Height (in meters, maximum one decimal house): 10.0
  - Number of Floors: 2.0
  - Deployment Area (in square meters, maximum one decimal house): 255.0
  - Gross Building Area (in square meters, maximum one decimal house): 510.0
  - Total Useful Area (in square meters, maximum one decimal house): 459.0
  - Maximum Gable Depth (in meters, maximum one decimal house): 15.0
- Environmental Context**
  - Goal Incident Irradiation (in kWh/m<sup>2</sup>): 1000
- Program**
  - Typology Identification: T5
- Interior Space**
  - Spaces of Permanence

Figura 6.11 : Página do LIDIA relativa ao “Contexto, Programa e Espaço Interior”.

→ descrevendo com maior detalhe a página do “Contexto, Programa e Espaço Interior”, a qual se ilustra na figura 6.11, esta contém as variáveis da gramática descritiva da gramática do envelope de edifícios, estruturadas segundo os quatro grupos principais de características que descrevem o contexto de um projeto, nomeadamente o “Contexto Legal”, o “Contexto Ambiental”, o “Programa” e o “Espaço Interior”. É possível pois nesta página visualizar os valores para as variáveis do contexto do projeto do envelope de um edifício. Foram inseridas apenas algumas das variáveis da gramática descritiva, nomeadamente aquelas que se consideraram ser mais relevantes, com o intuito de simplificar e de restringir ao essencial a informação que é visualizada pelo projetista nesta página do interface. Numa etapa posterior de investigação, pretende-se também possibilitar que o projetista não apenas visualize a informação presente nesta página, mas que também a possa editar, alterando os valores para as diversas variáveis relativas ao contexto do projeto do envelope de um edifício;

→ a página seguinte à página do “Contexto, Programa e Espaço Interior” refere-se à página da “Forma Inicial”, onde é possível visualizar a forma inicial definida para o envelope do edifício em projeto. A parte inferior da janela da forma inicial contém também um menu de avaliação, onde é possível ativar e desativar uma janela de análise e avaliação da irradiação solar incidente no envelope de um edifício. A figura 6.12 ilustra um exemplo de uma janela da “Forma Inicial”, com o exemplo de uma forma inicial definida para o envelope de um edifício;

→ as páginas seguintes à página da “Forma Inicial” são páginas designadas por páginas de “Transformação”, e contém os elementos que permitem ao projetista definir uma transformação na forma do envelope de um edifício, de modo a que este tenha um eficiente desempenho no que se refere à quantidade de irradiação solar incidente que capta.

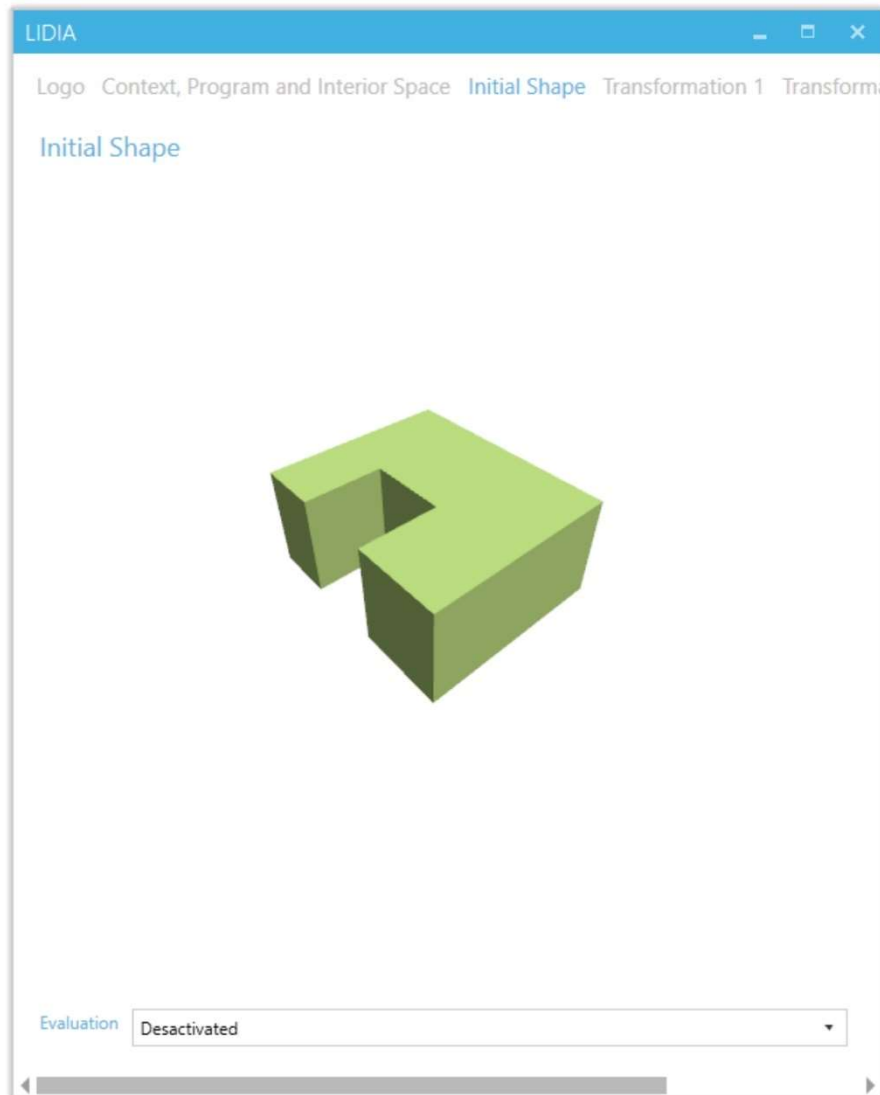


Figura 6.12 : Exemplo de uma página do LIDIA relativa à “Forma Inicial”.

A figura 6.13 ilustra um exemplo de uma página de “Transformação”. Os elementos presentes em uma página de “Transformação” são:

- a “Forma a ser Transformada”, que se refere à forma do envelope sobre a qual é operada uma transformação de forma. Este elemento inclui um menu onde é possível escolher qual a forma a ser transformada, podendo essa forma ser a forma inicial do envelope ou outra forma que tenha sido obtida a partir de uma operação de transformação anteriormente aplicada. Abaixo da visualização da forma a ser transformada encontra-se presente um outro menu onde é possível ativar ou desativar a avaliação da irradiação solar incidente sobre a forma a ser transformada. Selecionando-se a opção de ativar a avaliação, uma outra janela se abre

no écran do computador, complementando a janela principal do LIDIA. Esta outra janela refere-se à janela de análise e avaliação da irradiação solar incidente no envelope do edifício, onde é possível visualizar, para além da irradiação solar incidente, uma estimativa da geração de energia elétrica e uma estimativa do consumo de energia elétrica.

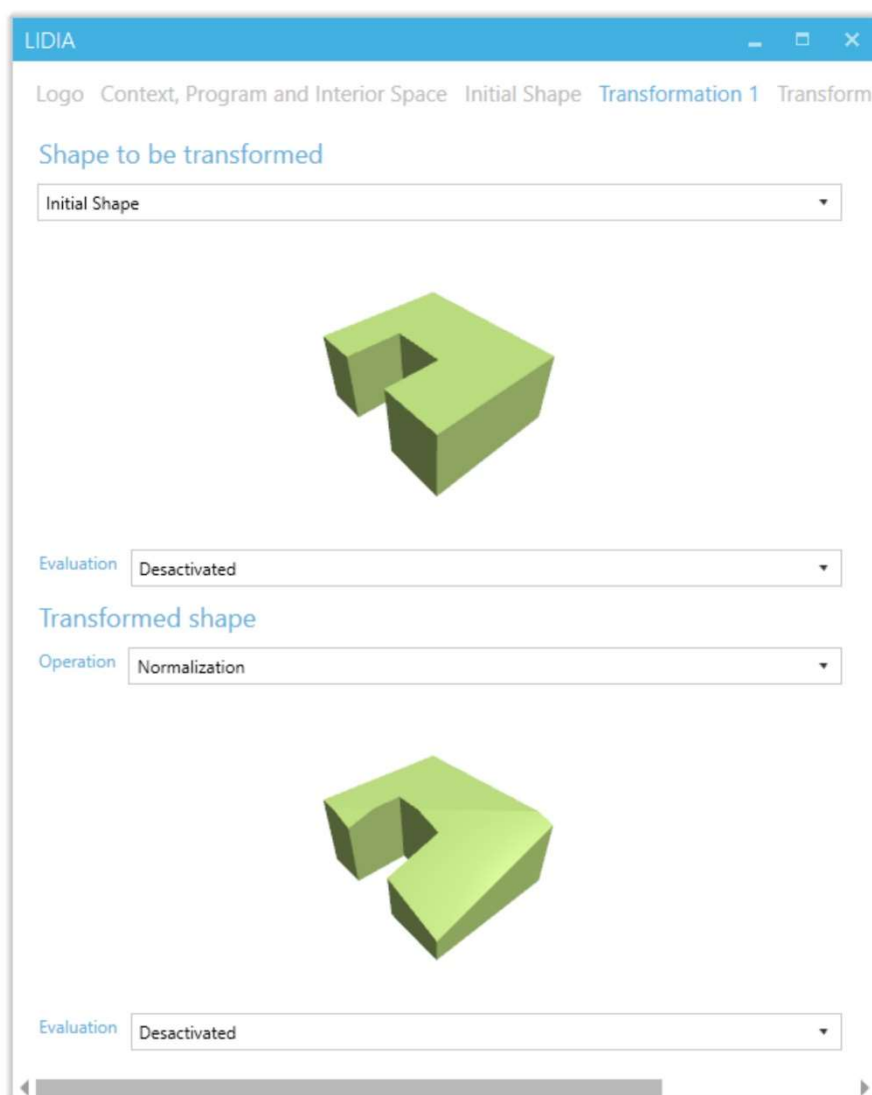


Figura 6.13 : Exemplo de uma página de “Transformação”.

A figura 6.14 ilustra um exemplo de uma parte (a parte superior) de uma janela de avaliação para uma forma projetada para o envelope de um edifício. Conforme se pode visualizar, a avaliação é feita para a forma total do envelope, ou seja, para todas as superfícies do envelope. No entanto, é feita uma avaliação também para as superfícies do envelope que dizem respeito apenas à cobertura do edifício. A avaliação apenas para as

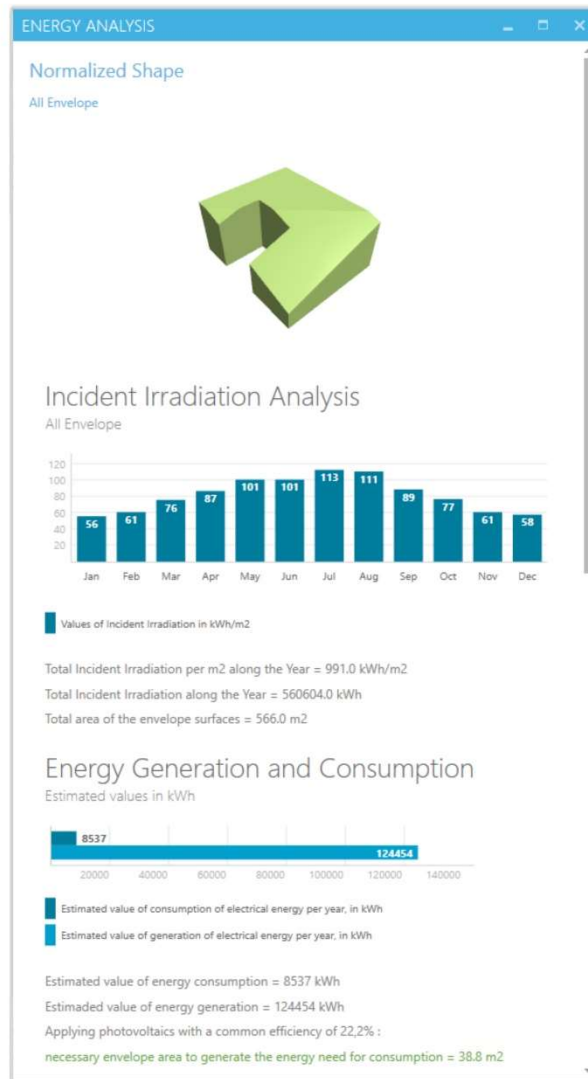


Figura 6.14 : Exemplo de uma janela de Avaliação do envelope de um edifício (a parte superior).

superfícies da cobertura é feita pelo facto de as superfícies da cobertura apresentarem habitualmente uma maior eficiência de irradiação solar incidente no envelope, comparativamente às restantes superfícies do envelope do edifício. Como tal, são superfícies que merecem uma atenção e uma avaliação particular. A figura 6.15 mostra o exemplo de uma parte inferior de uma janela de avaliação, a qual revela a avaliação que é feita apenas para as superfícies da cobertura do edifício em projeto. Quer a avaliação para o envelope total do edifício, quer a avaliação para as superfícies da cobertura, é composta por um gráfico que mostra os valores da irradiação solar incidente ao longo do ano, encontrando-se abaixo desse gráfico a indicação de três valores: a irradiação incidente

total por metro quadrado ao longo do ano (valor em kWh/m<sup>2</sup>), a irradiação incidente total ao longo do ano (valor em kWh) e a área total das superfícies do envelope avaliadas (em m<sup>2</sup>). Logo abaixo encontra-se também um gráfico que ilustra a estimativa da geração e consumo de energia, o qual indica os valores totais estimados para a geração e para o consumo de energia elétrica no edifício (valores em kWh).

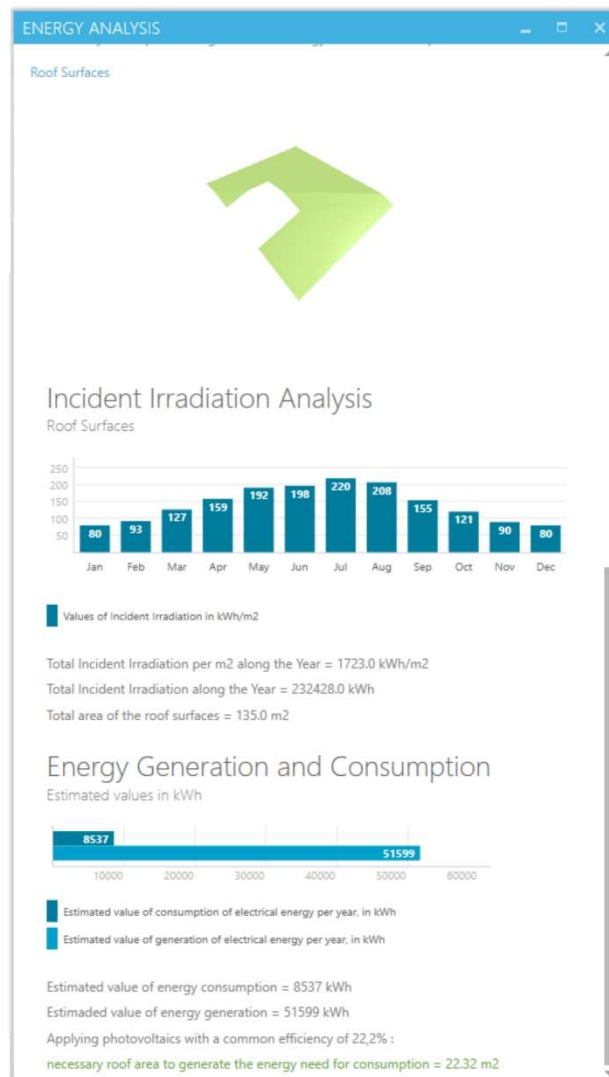


Figura 6.15 : Exemplo de uma janela de Avaliação do envelope de um edifício (a parte inferior).

Complementando esse gráfico, aparece a indicação de três valores que reforçam a leitura do gráfico, sendo esses valores a energia estimada para o consumo (estimativa que é feita a partir do número de habitantes previstos para o edifício em projeto), a energia estimada que é gerada, e

a área das superfícies avaliadas que é necessária que seja coberta por tecnologia fotovoltaica, de modo a que a energia estimada que é gerada seja equivalente à energia estimada para o consumo;

- para além da “Forma a ser Transformada”, uma página de transformação contém também os elementos relativos à “Forma Transformada”, os quais consistem em um menu onde é possível escolher qual a operação de transformação de forma a ser aplicada à “Forma a ser Transformada”, podendo-se visualizar logo abaixo desse menu a “Forma Transformada”. Também abaixo da visualização da “Forma Transformada” encontra-se presente um menu onde é possível ativar ou desativar a avaliação da irradiação solar incidente sobre a forma transformada. Ativando a avaliação, surge uma nova janela onde é possível visualizar a avaliação da irradiação solar incidente na forma em questão, janela essa com o conteúdo semelhante ao da janela descrita no ponto anterior, referente à “Forma a ser Transformada”.

Deste modo, a utilização em simultâneo da janela principal do interface do LIDIA, em conjunto com as janelas de avaliação da irradiação solar incidente às formas projetadas para o envelope, permite ao projetista evoluir no processo de geração da forma para o envelope do edifício em projeto, podendo visualizar as avaliações feitas às formas que vão sendo geradas. Isso constitui uma mais valia para o projetista, pois este pode visualizar em simultâneo, e comparar, no écran de computador, as diferentes formas geradas para o envelope do edifício em projeto, com a respetiva avaliação da irradiação solar incidente. Isso não é possível de conseguir utilizando apenas os softwares Rhinoceros 3D e Grasshopper, pelo que este factor constitui a principal vantagem da utilização do interface simplificado de utilizador do LIDIA, durante o processo de projeto para o envelope de edifícios.

## 6.4 Síntese do Capítulo

São referidos neste capítulo os fatores que caracterizam a elaboração de um protótipo de software, o LIDIA. O LIDIA implementa a gramática do envelope de edifícios e permite o projeto digital de envelopes de edifícios. Consiste assim em

um instrumento prático de projeto que permite projetar envelopes de edifícios com um eficiente desempenho energético, ou seja, que geram no mínimo a energia que o edifício consome durante o seu ciclo de vida. A geração de energia é feita através da exposição dos envelopes dos edifícios à irradiação solar incidente, a qual é transformada em energia elétrica através da utilização de tecnologia fotovoltaica.

São discutidos os aspetos que definiram a conceção do LIDIA, os aspetos envolvidos na implementação da gramática do envelope de edifícios, bem como o modelo de interface gráfico relacionado com a utilização do LIDIA.

Podem ser extraídos deste capítulo os seguintes contributos para o conhecimento e para a prática da Arquitetura:

- O início da criação de um instrumento prático de projeto, o LIDIA, o qual permite utilizar de um modo interativo, apelativo e intuitivo a Gramática do Envelope de Edifícios, bem como estabelecer um tipo de projeto, o Projeto Digital de Envelopes de Edifícios, o qual contribui para a teoria e para a prática da disciplina da Arquitetura;

- A definição de um método de criação de instrumentos práticos de projeto, nomeadamente instrumentos digitais como é o caso dos softwares. A implementação de uma gramática genérica discursiva, utilizando uma gramática descritiva e diferentes gramáticas de forma complementares entre si, por meio de programação textual, em um ambiente de programação visual, permite a elaboração pelos projetistas de diferentes algoritmos para o envelope de edifícios, podendo depois as soluções formais geradas por tais algoritmos serem exploradas de um modo interativo, apelativo e intuitivo em um interface gráfico simplificado de utilizador pelos utilizadores finais do software. O método definido inclui as seguintes fases:

→ “Implementação de uma gramática genérica discursiva através de programação textual, por um investigador ou por um projetista, em um ambiente de programação visual”;

→ “Elaboração pelos projetistas de algoritmos por programação visual”;

→ “Exploração, pelos projetistas e/ou pelos clientes, das soluções formais permitidas pelos algoritmos, em um interface gráfico simplificado de utilizador”.

Consiste como tal em um método que pode ser utilizado para a elaboração de outros instrumentos práticos digitais, os quais podem ser aplicados no projeto de arquitetura de edifícios.



# **CAPÍTULO 7**

## **Projeto digital do envelope de duas tipologias de moradias unifamiliares**



## CAPÍTULO 7

# Projeto digital do envelope de duas tipologias de moradias unifamiliares

Apresenta-se neste capítulo um caso de estudo relativo ao Projeto Digital de Envelopes de Edifícios, o qual consiste no projeto digital do envelope de duas tipologias de moradias unifamiliares, apoiado pelo protótipo LIDIA. São indicadas a localização e o contexto do projeto para as moradias unifamiliares, é relatado o processo de projeto adotado, testando e aplicando em concreto o LIDIA no processo de conceção do envelope das moradias, e são analisados os resultados obtidos durante o processo de projeto, sendo discutidas as relações entre forma e desempenho energético das soluções geradas para os envelopes das moradias.

### 7.1 Descrição do caso de estudo

Para o desenvolvimento do caso de estudo relativo ao Projeto Digital de Envelopes de Edifícios, optou-se por abordar o projeto do envelope da tipologia de moradias unifamiliares isoladas.

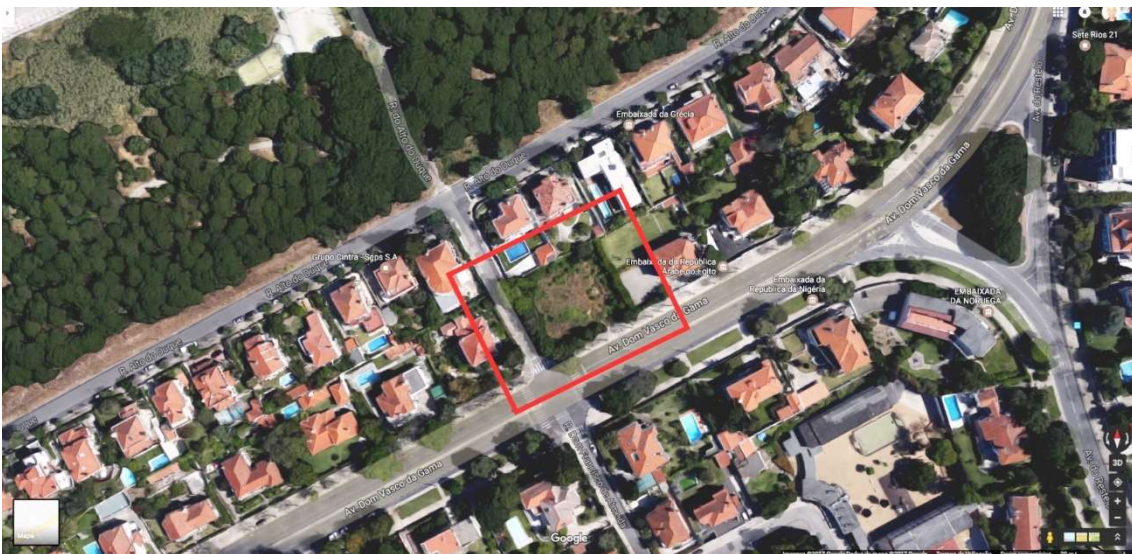


Figura 7.1 : Localização do lote urbano vago na freguesia de Belém, cidade de Lisboa. Lote assinalado a vermelho.

Foi escolhido um lote urbano vago (à data de realização da presente tese), localizado na freguesia de Belém, cidade de Lisboa, em Portugal, para o desenvolvimento do caso de estudo. A Figura 7.1 mostra a localização do lote urbano em questão. Escolheu-se para o desenvolvimento do caso de estudo a tipologia de moradias unifamiliares isoladas, por se tratar da tipologia de edifícios que tem menos condicionantes morfológicas, podendo todas as superfícies do envelope serem alteradas e transformadas. Deste modo, é possível avaliar com maior abrangência as possibilidades de exploração formal do envelope deste tipo de tipologia, comparativamente à exploração formal que se poderia fazer em outros tipos de tipologias mais condicionadas, como por exemplo o edifício de habitação coletiva em altura. Esta última tipologia muitas das vezes não possibilita a alteração de todas as superfícies do seu envelope, nomeadamente as superfícies das empenas, pelo facto do envelope se encontrar habitualmente rodeado pelo envelope de outros edifícios. Espera-se assim que ao se adquirir conhecimento sobre o impacto das transformações de forma operadas sobre todas as superfícies do envelope da tipologia de moradia, se possa vir a utilizar esse conhecimento para operar sobre tipologias distintas, mais condicionadas, tal como o edifício de habitação coletiva em altura. Importa referir que no caso da habitação coletiva em altura, o protótipo LIDIA poderá funcionar melhor ao nível do(s) arruamento(s) que delimitam o edifício, em vez de ao nível do lote, como sucede no caso das moradias. Trata-se de um enquadramento urbano que deverá ser incorporado no futuro, estando relacionado com uma intervenção ao nível do desenho urbano que por agora não se justifica abordar.

O facto das moradias serem uma das tipologias energeticamente mais consumidoras e menos sustentáveis, faz com que sejam também uma tipologia adequada para testar e validar o Projeto Digital de Envelopes de Edifícios. A exploração de soluções formais para o envelope de moradias permite que as moradias fiquem com capacidade para gerar mais energia quer para consumo próprio, quiçá tornando-as auto-suficientes em termos energéticos, quer para armazenamento e fornecimento de energia excedentária, se a houver, à rede de infraestrutura elétrica. Apesar da tipologia de moradia provocar a expansão de modelos urbanos de baixa densidade, incentivando o uso do automóvel, há que referir que:

1 - a utilização de zonas urbanas de baixa densidade, no tecido urbano de uma cidade, é adequada para promover o aumento do solo permeável à água, bem como para estabelecer o contacto próximo das pessoas com o solo e com a natureza. As zonas urbanas de baixa densidade devem existir com equilíbrio no tecido urbano de uma cidade, complementando as zonas urbanas de média e de alta densidade, permitindo um tipo de vivência urbana distinto destas últimas;

2 - apesar de incentivar o uso do automóvel, as zonas urbanas de baixa densidade podem produzir a energia necessária para o abastecimento de automóveis elétricos, contribuindo deste modo para a criação de cidades e de modos de transporte sustentáveis. A utilização do automóvel deixa deste modo de ser vista como um fator nefasto para o ambiente, uma vez que os automóveis elétricos consomem energia elétrica renovável e não emitem gases poluentes para o ambiente.

Em suma, a tipologia de moradia, escolhida como caso de estudo para o desenvolvimento e validação do Projeto Digital de Envelopes de Edifícios, constitui um caso crítico por ser a tipologia de edifício que se pode revelar mais problemática no que diz respeito à sustentabilidade ambiental. O recurso ao Projeto Digital de Envelopes de Edifícios pode permitir inverter esta situação, ao viabilizar o projeto de moradias capazes de produzir energia, não só a energia que as moradias necessitam, mas também a energia necessária para o funcionamento de automóveis elétricos, mais amigos do ambiente. Como tal, validando-se a utilidade do Projeto Digital de Envelopes de Edifícios na tipologia que apresenta características mais extremas, no que se refere ao impacto nefasto sobre o ambiente, abre-se caminho para a experimentação da sua viabilidade em tipologias menos agressivas para o ambiente, como é o caso do edifício de habitação coletiva em altura. O caso de estudo da tipologia de moradia constitui por isso um teste adequado para a utilização do protótipo LIDIA.

Importa também referir que a Gramática do Envelope de Edifícios, a qual permite o Projeto Digital de Envelopes de Edifícios e é apresentada no capítulo 5 da presente tese, foi desenvolvida tendo como foco a tipologia de moradia

unifamiliar isolada, mas o objetivo é que possa ser aplicada a outras tipologias de moradias e de edifícios de habitação (como a moradia geminada, a moradia em banda, a habitação coletiva em altura e isolada, a habitação coletiva em altura e em banda, ou outra), bem como a outros tipos de programas de edifícios (como os de comércio, serviços, uso misto, ou equipamentos). Numa futura fase de investigação, pretende-se pois permitir também a geração do envelope para outras tipologias e programas de edifícios, desenvolvendo-se para isso exemplos de projetos específicos de envelopes para essas tipologias e programas de edifícios.

Prosseguindo, de modo a definir o contexto de projeto para as tipologias de moradias unifamiliares, na localização prevista, teve-se em consideração o conjunto de características estabelecidas na gramática descritiva da gramática do envelope de edifícios, características essas que estão presentes na Figura 5.2 do capítulo 5. Assim, procedeu-se ao preenchimento da tabela ilustrada na Figura 5.2 com os valores necessários para a definição da descrição inicial do projeto do envelope das moradias. É possível ver tal tabela preenchida nos Anexos, para duas tipologias de moradia, uma de tipologia T2 (considerada como uma tipologia de dimensão mínima para o lote urbano em questão) e uma de tipologia T5 (considerada como uma tipologia de dimensão máxima para o mesmo lote). O Anexo A7.1 corresponde à tipologia T2 e o Anexo A7.2 à tipologia T5. Foi estabelecido como objetivo, nas tabelas preenchidas para as tipologias T2 e T5, que a variável irradiação incidente pretendida por  $m^2$ , relativa à totalidade das superfícies do envelope, atinja no mínimo um valor de 1000 kWh/ $m^2$ . O valor de 1000 kWh/ $m^2$  é meramente indicativo, trata-se de um valor que é possível de alcançar e que permite uma produção considerável de energia elétrica por  $m^2$  de área do envelope. Como tal, durante o processo de geração das formas para o envelope, as formas geradas deverão ter uma eficiência mínima de 1000 kWh/ $m^2$  na captação da irradiação solar incidente. Estando definidas as referidas tabelas com os valores necessários para a constituição de uma descrição inicial do projeto, quer para uma moradia de tipologia T2, quer para uma moradia de tipologia T5, procedeu-se à inserção dos valores das suas variáveis em componentes de “Contexto” do protótipo LIDIA no software

Grasshopper. A Figura 7.2 mostra um exemplo de um componente de “Contexto Legal” do LIDIA, preenchido para a moradia de tipologia T5.

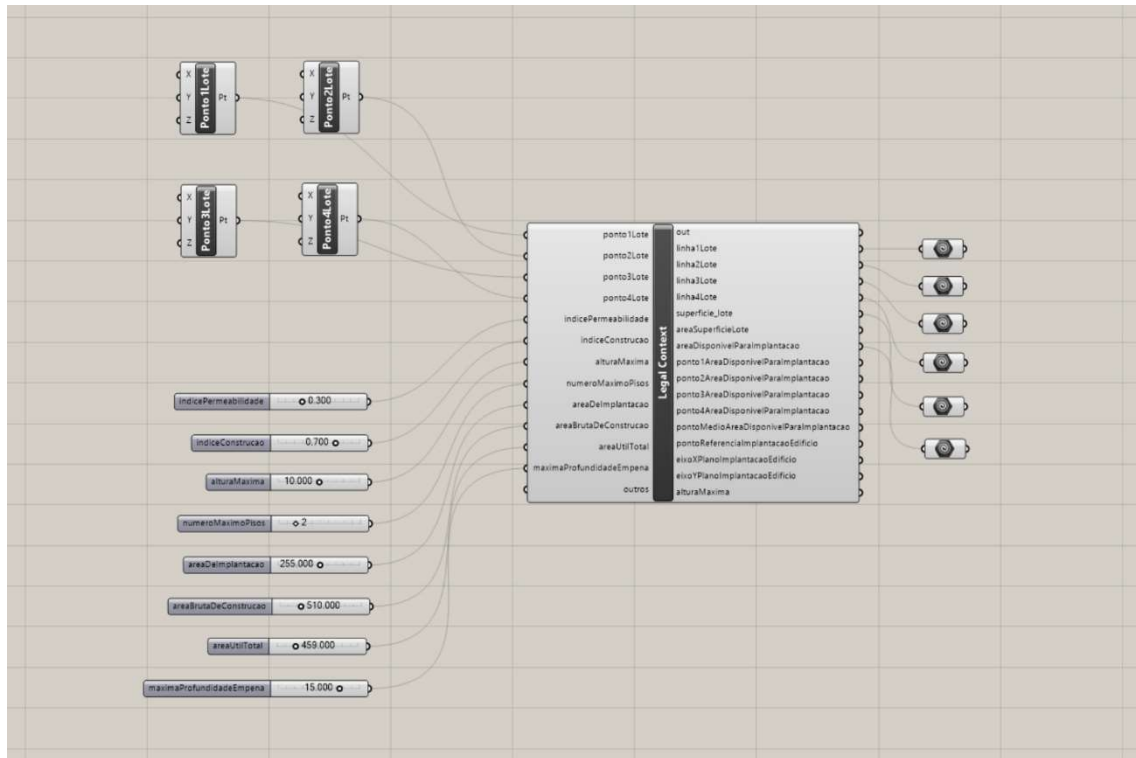


Figura 7.2 : Inserção dos dados para a moradia de tipologia T5 no componente de “Contexto Legal” do protótipo LIDIA.

Após inseridos tais valores nos componentes de “Contexto”, é possível prosseguir com o projeto digital do envelope da moradia para as tipologias T2 e T5, elaborando-se para esse efeito algoritmos com os componentes disponibilizados no Grasshopper pelo protótipo LIDIA.

## 7.2 Projeto Digital do Envelope das Moradias

No projeto digital do envelope das moradias, consideraram-se duas tipologias tipo para as moradias, a tipologia T2 e a tipologia T5. Ambas as tipologias foram elaboradas a partir de um módulo paramétrico comum, um paralelepípedo com as dimensões de 12,2 metros de comprimento, 14,6 metros de largura e 5,5 metros de altura para a tipologia T2 e um paralelepípedo com as dimensões de 12,2 metros de comprimento, 14,6 metros de largura e 7 metros de altura para a tipologia T5. A utilização do módulo comum destina-se a permitir a elaboração

de diferentes tipologias a partir do mesmo modelo conceptual. As Figuras 7.3 e 7.4 mostram as plantas elaboradas para as tipologias T2 e T5 enquadradas pelo módulo paramétrico comum. As Figuras 7.5 e 7.6 ilustram a forma inicial do envelope das tipologias T2 e T5, de acordo com as plantas que foram definidas para essas mesmas tipologias.

Importa referir que as plantas das moradias de tipologias T2 e T5 foram elaboradas de acordo com os seguintes princípios conceptuais:

1 - adotar uma organização espacial das funções dos espaços das tipologias (tais como a sala de estar, a sala de refeições, a cozinha, os quartos, entre outros) que seja independente e desprovida do contexto exterior às tipologias. Focou-se assim a atenção na estrutura interna das tipologias, organizando os diferentes espaços e funções das tipologias de modo a que se inserissem racionalmente no interior do paralelepípedo definido para o módulo paramétrico comum. A organização e disposição dos diferentes espaços das tipologias, no interior do módulo paramétrico comum, é feita de modo a que cada espaço se localize na proximidade de outros espaços cujas funções lhe sejam complementares. A sala de refeições próxima da cozinha, a entrada próxima da cozinha e da sala de estar, e os quartos próximos da(s) casa(s) de banho, por exemplo. Assim, a organização dos diferentes espaços das tipologias é elaborada de acordo com um critério funcional interno, o qual não tem em conta o contexto externo onde as moradias se inserem;

2 - estipular valores para as dimensões de comprimento, largura e altura, bem como para a área, dos diferentes espaços das tipologias, que estejam de acordo com o estipulado em documentos legais e técnicos. Para tal, os valores em causa cumprem o que se encontra definido no RGEU (Regulamento Geral das Edificações Urbanas) (OASRS 2020) e no documento técnico Funções e Exigências de Áreas da Habitação (Portas 1969);

3 - sendo a organização dos espaços internos das tipologias, o “layout”, utilizando o termo em inglês, sido feita de acordo com a relação de

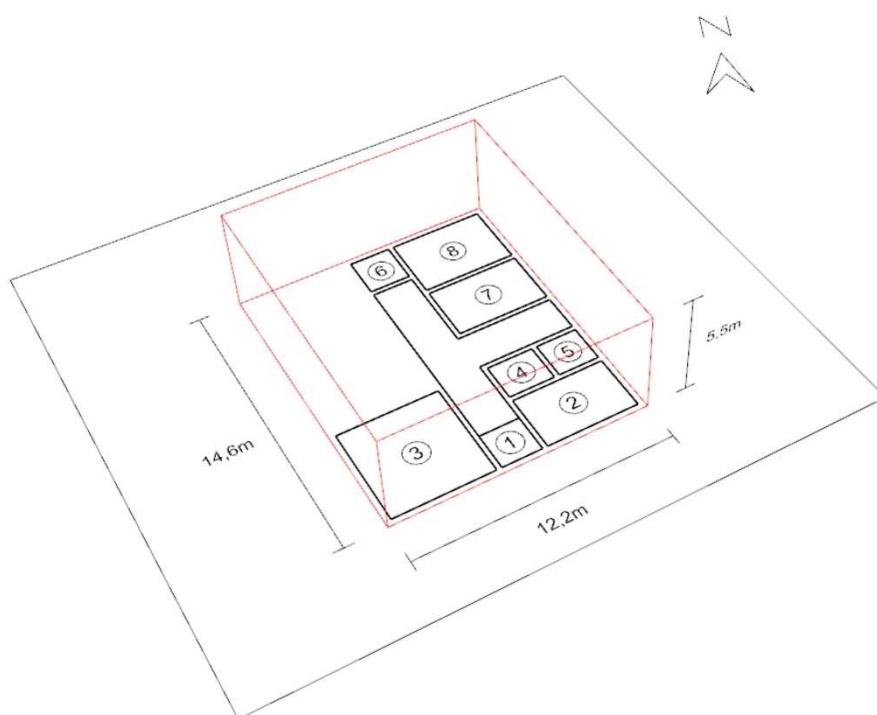


Figura 7.3 : Planta da tipologia T2 inserida no módulo paramétrico comum:

1 – Entrada; 2 – Cozinha; 3 – Sala de Estar e Sala de Jantar; 4 – Casa de Banho 1; 5 – Arrumos; 6 – Casa de Banho 2; 7 – Quarto 1; 8 - Quarto 2.

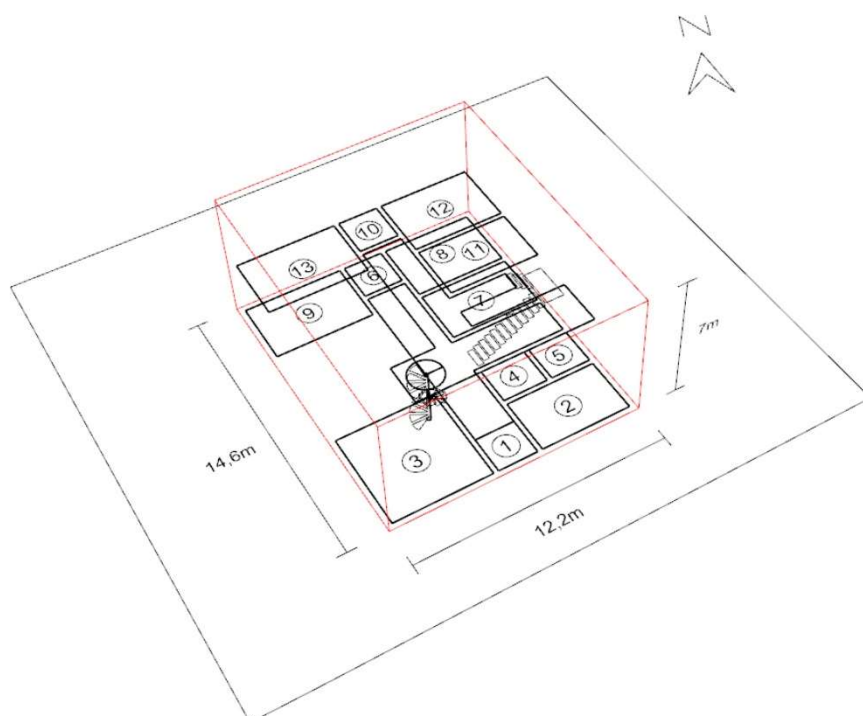


Figura 7.4 : Planta da tipologia T5 inserida no módulo paramétrico comum:

1 – Entrada; 2 – Cozinha; 3 – Sala de Estar e Sala de Jantar; 4 – Casa de Banho 1; 5 – Arrumos; 6 – Casa de Banho 2; 7 – Escritório; 8 - Quarto 1; 9 - Quarto 2; 10 – Casa de Banho 3; 11 - Quarto 3; 12 - Quarto 4; 13 - Quarto 5.

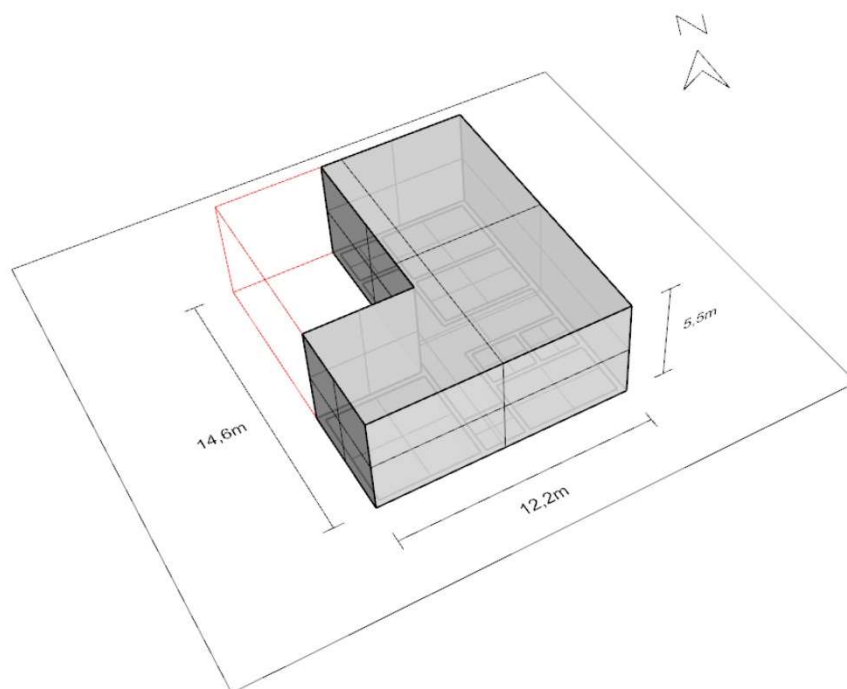


Figura 7.5 : Forma Inicial do envelope da tipologia T2.

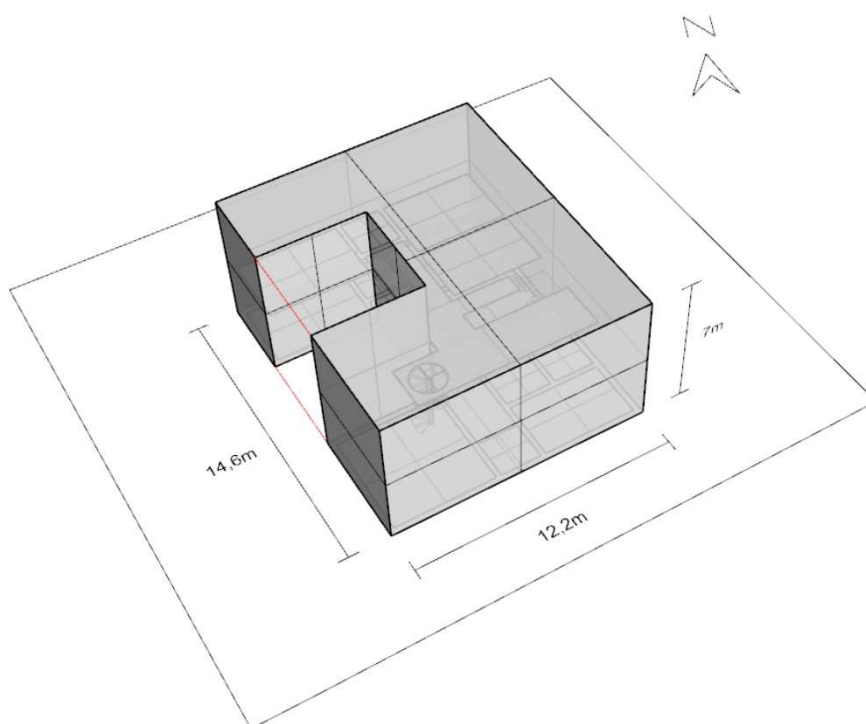


Figura 7.6 : Forma Inicial do envelope da tipologia T5.

proximidade entre as funções que os espaços desempenham, e de acordo com as dimensões e áreas estipuladas em documentos e regulamentos legais, a organização espacial das tipologias T2 e T5 forma o que se pode designar uma estrutura interna para essas tipologias. Tal lógica de estrutura interna segue o raciocínio elaborado por Peter Pearce (ver subcapítulo 2.1 do capítulo 2, Estado da Arte), que estabelece o conceito de forças intrínsecas, conceito esse que se refere às propriedades internas de um sistema, as quais governam os seus possíveis arranjos e o seu potencial desempenho (Pearce 1990, xiv). Deste modo, a organização dos espaços interiores elaborada para as tipologias T2 e T5 pode ser interpretada como um conjunto de forças intrínsecas, as quais uma vez colocadas perante um contexto, irão adaptar-se e conformar-se a esse contexto, de modo a obter um bom desempenho. No caso do projeto elaborado na presente tese, esse contexto está relacionado com: 1) a configuração do lote urbano onde as moradias de tipologias T2 e T5 são implantadas, e 2) com a exposição à radiação solar dos envelopes das moradias. Esses dois fatores constituem o conjunto de forças extrínsecas que irão moldar o conjunto de forças intrínsecas das moradias T2 e T5, de modo a que estas obtenham um bom desempenho, no que se refere à adequação das moradias à configuração do lote onde se inserem e no que se refere à irradiação solar incidente sobre o envelope das moradias.

Foram consideradas duas estratégias distintas de projeto, elaborando-se dois tipos de forma para o envelope das moradias:

1 – envelope estático;

2 – envelope dinâmico.

O projeto da forma para o envelope estático pretende explorar soluções formais que cumpram os seguintes critérios:

- obedeça aos valores estabelecidos para o contexto do projeto, valores esses que se encontram inseridos nos componentes de “Contexto” do protótipo LIDIA no Grasshopper;

- a forma do envelope da moradia é fixa e encontra-se exposta aos raios solares ao longo do ano, de modo a que seja capaz de gerar no mínimo, por meio da utilização de tecnologia fotovoltaica, a energia que o edifício consome durante o seu ciclo de vida;
- a estética da forma do envelope da moradia é considerada satisfatória pelo projetista e/ou pelo utilizador final da moradia.

De igual modo, o envelope dinâmico pretende explorar soluções formais que cumpram os seguintes critérios:

- obedeça aos valores estabelecidos para o contexto do projeto, valores esses que se encontram inseridos nos componentes de “Contexto” do protótipo LIDIA no Grasshopper (critério semelhante ao do estado estático);
- a forma do envelope da moradia é dinâmica, ou seja, a forma do envelope varia ao longo do dia e do ano, de modo a que as superfícies do envelope se exponham de um modo mais eficiente aos raios solares. O envelope da moradia deverá ser capaz de gerar no mínimo, por meio da utilização de tecnologia fotovoltaica, a energia que a moradia necessita durante o seu ciclo de vida;
- a estética da forma do envelope da moradia é considerada satisfatória pelo projetista e/ou pelo utilizador final da moradia (critério semelhante ao do estado estático).

Em simultâneo com as duas estratégias de projeto adotadas para o projeto do envelope das moradias (envelope estático e envelope dinâmico), foram também considerados três níveis de complexidade formal para o envelope estático:

- 1 – um nível básico;
- 2 – um nível intermédio;
- 3 – um nível avançado.

O nível básico caracteriza-se por cada uma das superfícies originais do envelope da moradia terem sido submetidas no máximo a uma operação de normalização e a nenhuma operação de rotação e de divisão. O nível intermédio define-se por pelo menos uma das superfícies originais do envelope da moradia ter sido submetida a uma operação de rotação, a uma operação de normalização e a nenhuma operação de divisão. O nível avançado distingue-se por pelo menos uma das superfícies originais do envelope ter sido submetida a uma operação de rotação, a uma operação de divisão e a duas operações de normalização.

As Figuras 7.7 a 7.12 ilustram soluções de projeto geradas através do protótipo LIDIA para formas do envelope da moradia com as características indicadas. As Figuras 7.7, 7.8, 7.10 e 7.11 mostram os exemplos de envelopes estáticos, desde o nível de complexidade básico ao avançado. As Figuras 7.9 e 7.12 dizem respeito a exemplos de envelopes dinâmicos, os quais foram feitos para o nível intermédio. Todas as figuras em questão indicam o desempenho energético, no que diz respeito à irradiação solar incidente, alcançado pela forma do envelope da moradia.

Conforme se constata nos exemplos de formas estáticas, as operações de Normalização, Rotação e Divisão da Gramática do Envelope de Edifícios provocam alterações no desempenho da forma do envelope da moradia, no que se refere à irradiação incidente dos raios solares. Analisando a Figura 7.7, é possível verificar que na moradia de tipologia T2, a transformação de A (Forma Inicial) para B (Forma de Nível Básico) por meio de uma operação de Normalização, provoca um aumento da irradiação incidente no envelope de 1028 kWh/m<sup>2</sup> para 1097 kWh/m<sup>2</sup>. A transformação de B para C (Forma de Nível Intermédio) através de uma operação de Rotação (atualizando também a operação de Normalização feita sobre a superfície da cobertura da moradia), faz com que a irradiação incidente diminua de 1097 kWh/m<sup>2</sup> para 1063 kWh/m<sup>2</sup>. A transformação de C para D (Forma de Nível Avançado) com as operações de Rotação (alterando o ângulo de rotação da forma em C), de Divisão e de nova Normalização, aumenta a irradiação incidente no envelope de 1063 kWh/m<sup>2</sup> para 1098 kWh/m<sup>2</sup>. Como tal, todas as transformações operadas melhoraram a eficiência da forma do envelope, relativamente à transformação anterior, no que

diz respeito à irradiação incidente, com exceção da transformação de B para C (Forma de Nível Intermédio) através da operação de Rotação, que provocou um ligeiro declínio no desempenho da forma do envelope. No entanto, a utilização de outros ângulos para a Rotação poderá provocar também uma melhoria no desempenho, aumentando o valor da irradiação incidente.

Na Figura 7.8 é possível analisar outras transformações de formas estáticas que foram feitas relativamente à Forma Inicial, transformações essas que procuram perceber as implicações de efetuar operações sobre uma das fachadas do envelope da moradia. A transformação de A (Forma Inicial) para E (Forma de Nível Básico) por meio de uma operação de Normalização sobre uma fachada do envelope, provoca um aumento da irradiação incidente no envelope de 1028 kWh/m<sup>2</sup> para 1054 kWh/m<sup>2</sup>. A transformação de E para F (Forma de Nível Básico) por meio de uma operação de Normalização sobre a cobertura, aumenta o valor da irradiação incidente de 1054 kWh/m<sup>2</sup> para 1089 kWh/m<sup>2</sup>.

No que diz respeito às formas dinâmicas, analisando a Figura 7.9, verifica-se para a moradia de tipologia T2 que uma operação de Normalização feita ao longo do ano para a mesma superfície (sendo a Normalização feita apenas quando mantém o pé-direito mínimo legal de 2.40 m no espaço interior da moradia), mantém o mesmo desempenho da forma no que diz respeito à irradiação incidente na totalidade do envelope. Tal transformação dinâmica foi realizada para a forma estática C e manteve o desempenho da totalidade do envelope em 1063 kWh/m<sup>2</sup>. O cálculo da avaliação da irradiação incidente foi efetuado pelo componente “Avaliação” do protótipo LIDIA, para 3 formas do envelope de forma dinâmica das 84 formas possíveis tendo em consideração o constrangimento do pé-direito mínimo necessário. A avaliação foi feita apenas para 3 formas de modo a simplificar o processo de cálculo, tendo-se dividido o ano em 3 períodos, o primeiro de 1 de Janeiro às 00h00 a 21 de Junho às 12h00 (sendo a Normalização neste período a correspondente à posição do sol no dia 20 de Maio às 13h00), o segundo de 21 de Junho às 12h00 a 19 de Julho às 13h00 (sendo a Normalização correspondente ao dia 21 de Junho às 12h00) e o terceiro de 19 de Julho às 13h00 a 31 de Dezembro às 24h00 (sendo a Normalização correspondente ao dia 19 de Julho às 13h00). Se a avaliação for feita para as 84

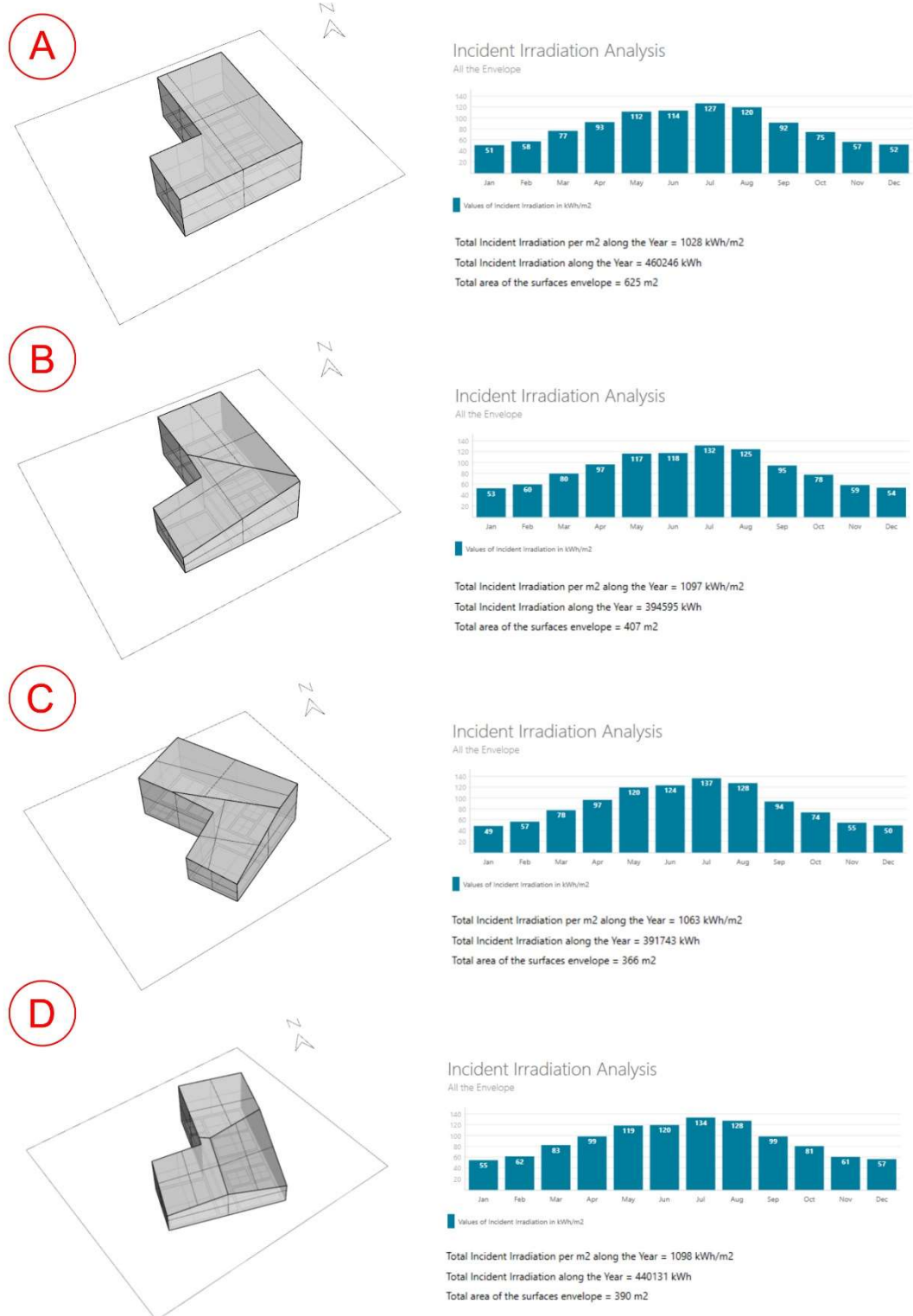
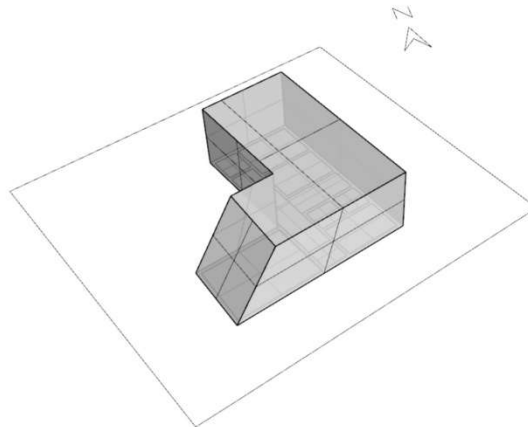


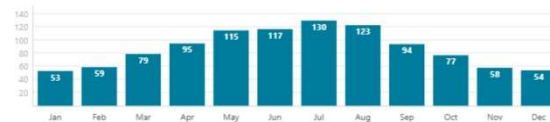
Figura 7.7 : Formas estáticas do envelope da tipologia T2 (parte1):  
A: Forma Inicial B: Nível Básico C: Nível Intermédio D: Nível Avançado.

**E**



### Incident Irradiation Analysis

All the Envelope



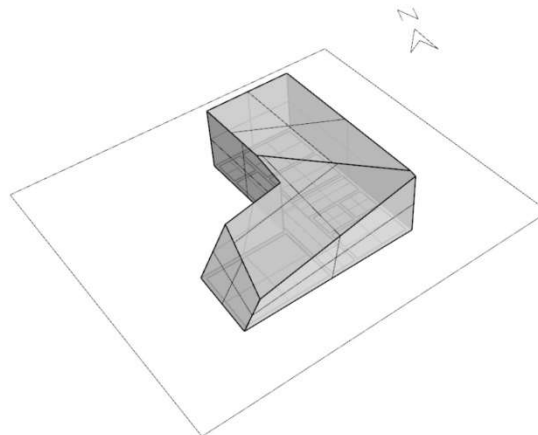
Values of Incident Irradiation in kWh/m2

Total Incident Irradiation per m2 along the Year = 1054.0 kWh/m2

Total Incident Irradiation along the Year = 471541.0 kWh

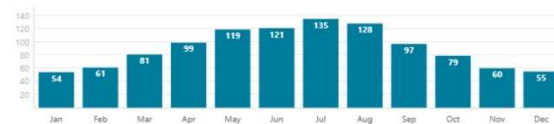
Total area of the surfaces envelope = 447.0 m2

**F**



### Incident Irradiation Analysis

All the Envelope



Values of Incident Irradiation in kWh/m2

Total Incident Irradiation per m2 along the Year = 1089.0 kWh/m2

Total Incident Irradiation along the Year = 454864.0 kWh

Total area of the surfaces envelope = 417.0 m2

Figura 7.8: Formas estáticas do envelope da tipologia T2 (parte 2):

E: Nível Básico com normalização em fachada F: Nível Básico com normalização em fachada e cobertura.

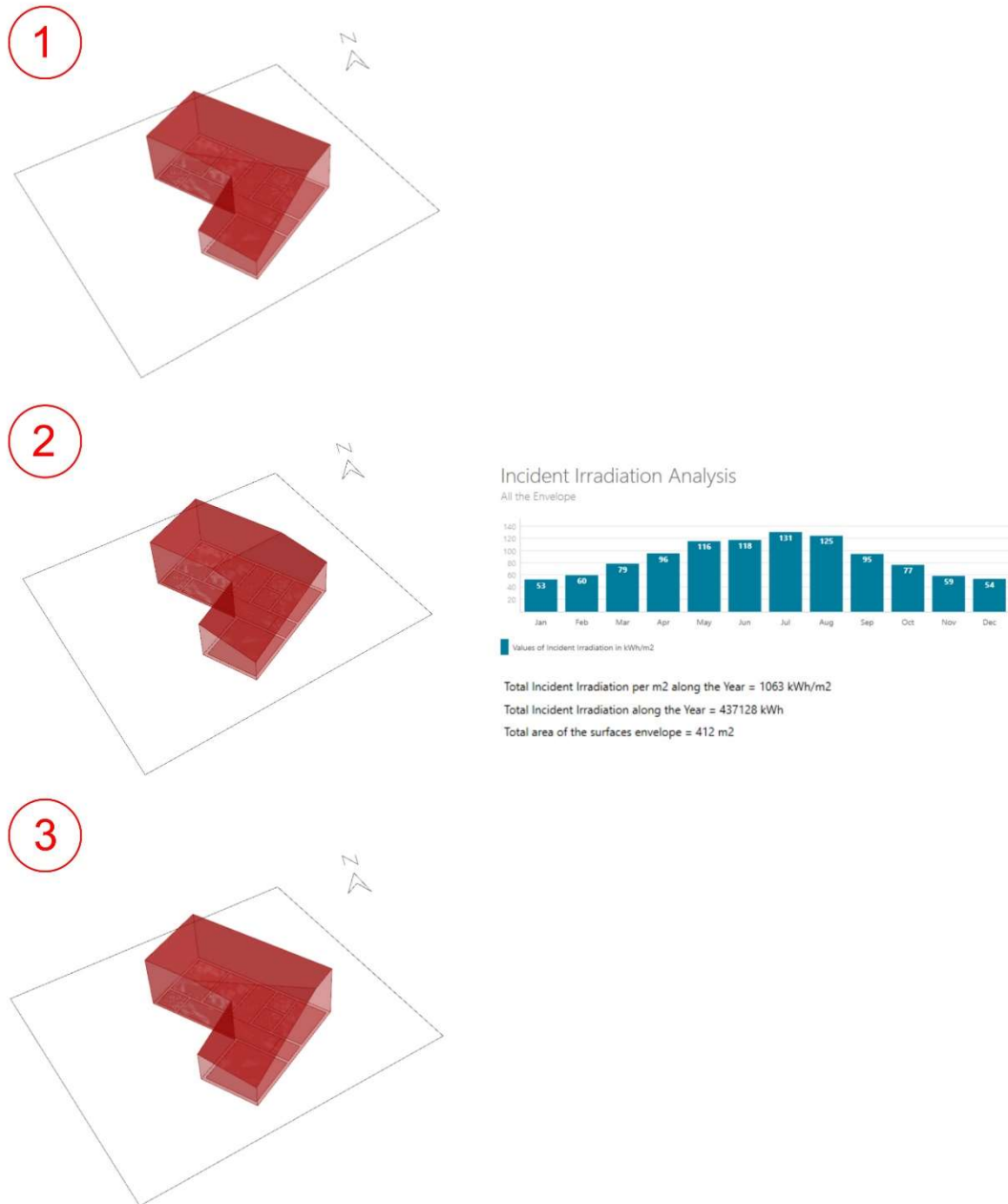


Figura 7.9 : Forma dinâmica do envelope da tipologia T2:  
1: Dia 20 de Maio às 13h00 2: Dia 21 de Junho às 12h00 3: Dia 19 de Julho às 13h00.

formas possíveis, dividindo-se o ano em 84 períodos, apenas um período temporal para cada uma das formas possíveis, de modo a diminuir o tempo de cálculo da avaliação, é expectável que o valor de irradiação incidente seja mais elevado do que 1063 kWh/m<sup>2</sup>. Pretende-se realizar tal avaliação em uma futura fase de investigação.

Visualizando a Figura 7.10, é possível constatar que no caso da moradia de tipologia T5, relativamente às formas estáticas, a transformação de A (Forma Inicial) para B (Forma de Nível Básico) por meio de uma operação de Normalização, provoca um aumento da irradiação incidente no envelope de 978 kWh/m<sup>2</sup> para 1019 kWh/m<sup>2</sup>. A transformação de B para C (Forma de Nível Intermédio) através de uma operação de Rotação (atualizando também a Normalização feita sobre a superfície da cobertura), faz com que a irradiação incidente aumente de 1019 kWh/m<sup>2</sup> para 1027 kWh/m<sup>2</sup>. Por último, a transformação de C para D (Forma de Nível Avançado) com as operações de Rotação (alterando o ângulo de rotação da forma em C), Divisão e de nova Normalização, aumenta a irradiação incidente no envelope de 1027 kWh/m<sup>2</sup> para 1034 kWh/m<sup>2</sup>. Deste modo, todas as transformações efetuadas melhoraram o desempenho da forma do envelope no que diz respeito à irradiação incidente sobre o mesmo.

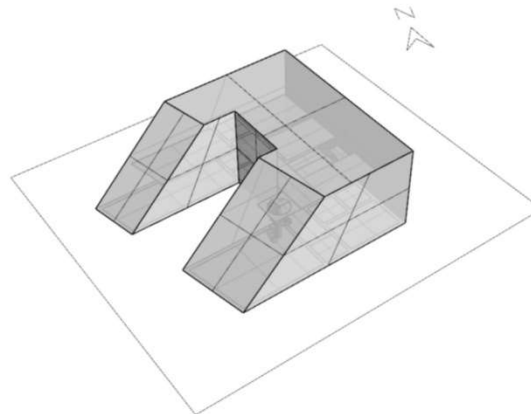
Foram também realizadas outras duas transformações de forma estática, relativamente à Forma Inicial, procurando perceber as implicações de efetuar operações sobre uma das fachadas do envelope da moradia. Tais transformações são possíveis de visualizar na Figura 7.11. A transformação de A (Forma Inicial) para E (Forma de Nível Básico) por meio de uma operação de Normalização sobre uma fachada do envelope, provoca um aumento da irradiação incidente no envelope de 978 kWh/m<sup>2</sup> para 1033 kWh/m<sup>2</sup>. A transformação de E para F (Forma de Nível Básico) por meio de uma operação de Normalização sobre a cobertura, aumenta o valor da irradiação incidente de 1033 kWh/m<sup>2</sup> para 1059 kWh/m<sup>2</sup>.

Ainda para a moradia de tipologia T5, no que se refere à forma dinâmica, foi feita também uma operação de Normalização ao longo do ano para a mesma



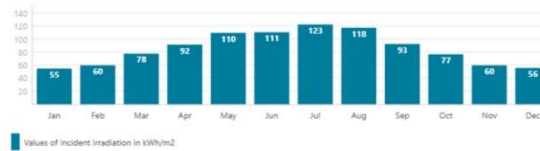
Figura 7.10 : Formas estáticas do envelope da tipologia T5 (parte 1)  
A: Forma Inicial B: Nível Básico C: Nível Intermédio D: Nível Avançado.

**E**



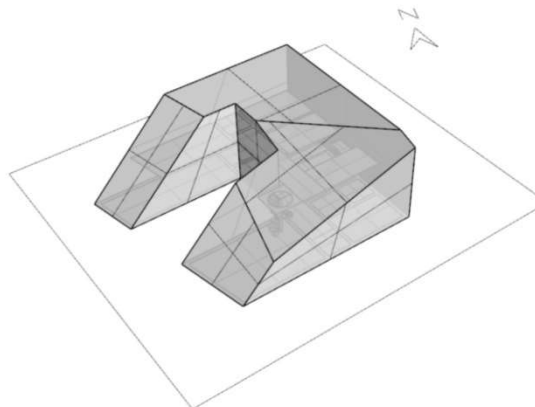
Incident Irradiation Analysis

All the Envelope



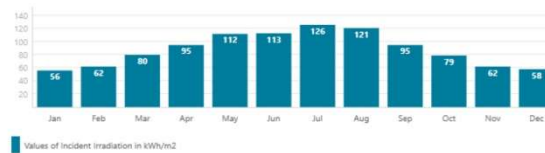
Total Incident Irradiation per m2 along the Year = 1033.0 kWh/m2  
 Total Incident Irradiation along the Year = 642698.0 kWh  
 Total area of the surfaces envelope = 621.0 m2

**F**



Incident Irradiation Analysis

All the Envelope



Total Incident Irradiation per m2 along the Year = 1059.0 kWh/m2  
 Total Incident Irradiation along the Year = 628922.0 kWh  
 Total area of the surfaces envelope = 595.0 m2

Figura 7.11 : Formas estáticas do envelope da tipologia T5 (parte 2)

E: Nível Básico com normalização em fachada F: Nível Básico com normalização em fachada e cobertura.

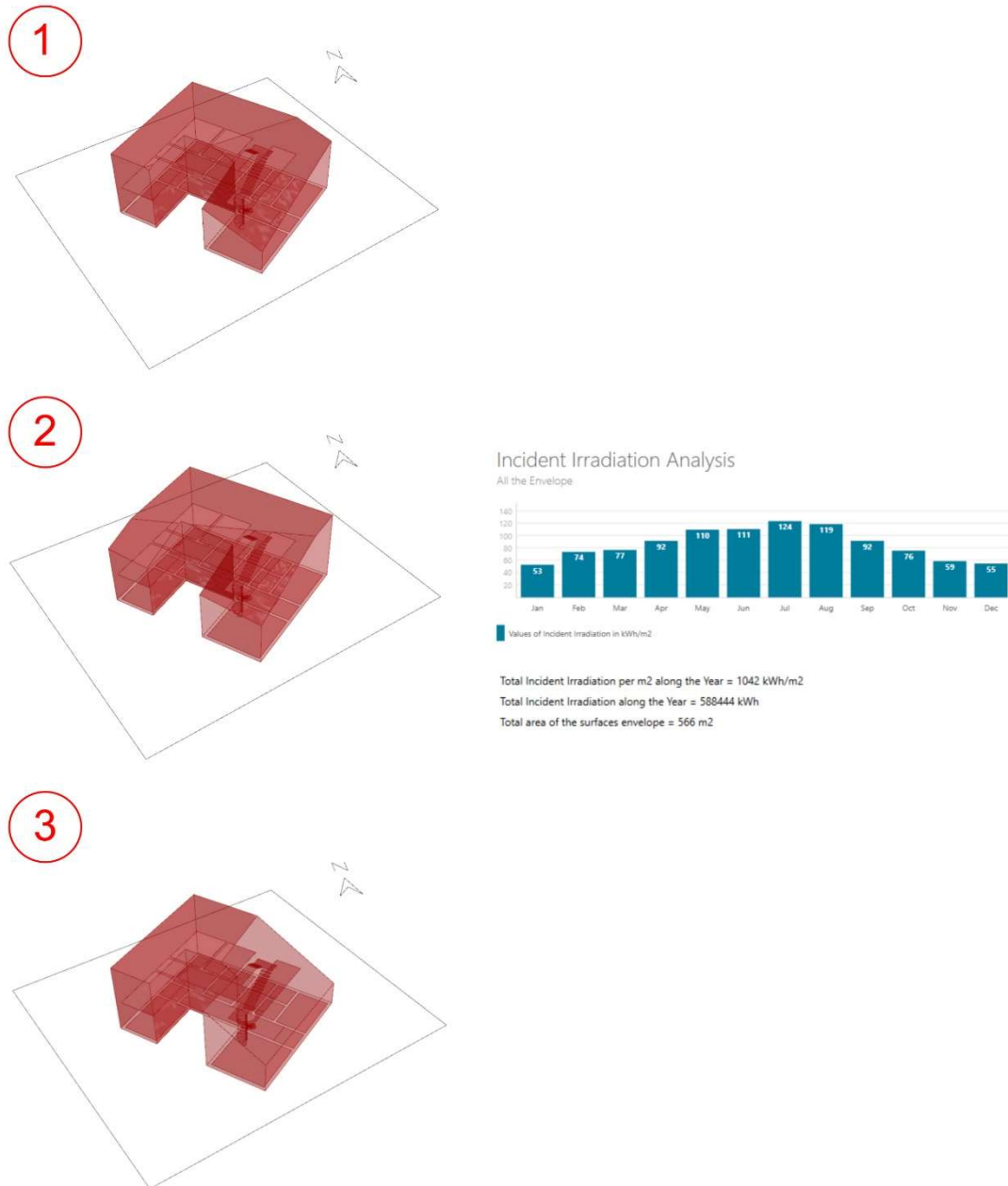


Figura 7.12 : Forma dinâmica do envelope da tipologia T5  
 1: Dia 7 de Maio às 12h00 2: Dia 3 de Julho às 13h00 3: Dia 21 de Julho às 11h00.

superfície (com o constrangimento de pé-direito mínimo de 2.40 m no espaço interior da moradia). Conforme se pode visualizar pela Figura 7.12, a transformação dinâmica foi realizada para a forma estática C e aumentou o desempenho do envelope de 1027 kWh/m<sup>2</sup> para 1042 kWh/m<sup>2</sup>. O cálculo da avaliação da irradiação incidente foi efetuado pelo componente “Avaliação” do protótipo LIDIA, para 3 formas do envelope de forma dinâmica das 206 formas possíveis tendo em consideração o constrangimento do pé-direito mínimo necessário. A avaliação foi feita apenas para 3 formas de modo a simplificar o processo de cálculo, tendo-se dividido o ano em 3 períodos, o primeiro de 1 de Janeiro às 00h00 a 3 de Julho às 13h00 (sendo a Normalização neste período a correspondente à posição do sol no dia 7 de Maio às 12h00), o segundo de 3 de Julho às 13h00 a 21 de Julho às 11h00 (sendo a Normalização correspondente ao dia 3 de Julho às 13h00) e o terceiro de 21 de Julho às 11h00 a 31 de Dezembro às 24h00 (sendo a Normalização correspondente ao dia 21 de Julho às 11h00). Também no caso da moradia de tipologia T5, se a avaliação for feita para as 206 formas possíveis, dividindo-se o ano em 206 períodos temporais, apenas um período temporal para cada uma das formas possíveis de modo a diminuir o tempo de cálculo da computação da avaliação, é expectável que o valor de irradiação incidente seja mais elevado do que 1042 kWh/m<sup>2</sup>. Pretende-se realizar tal avaliação em uma futura fase de investigação.

Tendo em conta os resultados obtidos para o projeto do envelope das moradias de tipologias T2 e T5, é legítimo considerar que as transformações operadas pela utilização da Gramática do Envelope de Edifícios, bem como pela utilização do protótipo LIDIA, são eficientes para melhorar o desempenho da forma do envelope no que se refere à irradiação solar incidente. Possibilita-se deste modo a geração de valores mais elevados de energia elétrica no envelope das moradias, visando torná-las auto-produtoras da energia que consomem durante o seu ciclo de vida. Em simultâneo, é possível explorar o aspeto estético das formas projetadas para o envelope. Como tal, a Gramática do Envelope de Edifícios e o protótipo LIDIA revelam-se instrumentos úteis para o Projeto Digital de Envelopes de Edifícios e para o Projeto baseado em Energia.

### 7.3 Análise da relação entre forma e desempenho energético do envelope

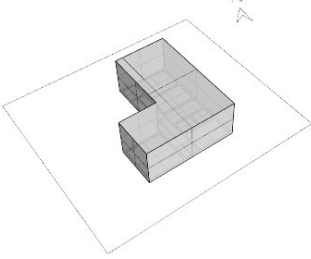
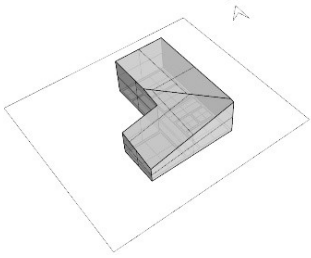
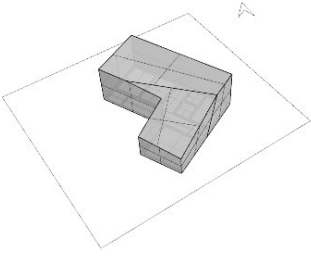
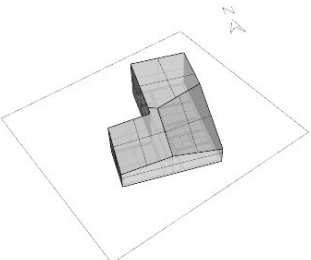
De modo a se analisar mais detalhadamente os resultados dos valores da irradiação incidente ao longo das transformações operadas à forma do envelope das moradias de tipologias T2 e T5, elaboraram-se as Figuras 7.13 a 7.18, onde são indicados os valores da irradiação incidente total e os valores de irradiação incidente por metro quadrado para toda a forma do envelope, bem como os valores de irradiação incidente total e os valores de irradiação incidente por metro quadrado para as superfícies da cobertura do envelope. Os valores obtidos para a superfície da cobertura do envelope são analisados em particular, uma vez que esta superfície é habitualmente aquela que apresenta valores mais elevados de irradiação incidente, em todo o envelope do edifício. Por vezes, basta a aplicação de tecnologia fotovoltaica na superfície da cobertura do envelope do edifício para se obterem valores de geração e produção de energia elétrica que são considerados satisfatórios, ou seja, que correspondem no mínimo às necessidades estimadas de consumo energético dos edifícios, neste caso de estudo em concreto, às necessidades de consumo energético das moradias de tipologias T2 e T5. São também analisados em particular os valores alcançados para as formas obtidas a partir de transformações operadas sobre uma das fachadas das moradias, procurando perceber as implicações no desempenho da forma do envelope, quando se efetuam operações de transformação sobre as fachadas do envelope.

Da análise dos valores de irradiação incidente para a moradia de tipologia T2, visíveis nas Figuras 7.13, 7.14 e 7.15, é possível constatar que:

- Nas formas estáticas, relativamente à Forma Inicial, as operações de Rotação, Normalização e Divisão aumentam o valor da irradiação incidente no envelope por  $m^2$ , mas diminuem o valor da irradiação incidente total no envelope. Ou seja, o desempenho da forma é maior no que se refere à irradiação incidente por  $m^2$  no envelope, mas menor no que se refere à irradiação incidente total. Isso verifica-se porque ao melhorar a exposição dos envelopes aos raios solares, a área da

superfície dos envelopes diminui, na maior parte dos casos, diminuindo o valor da irradiação incidente total nos envelopes. Na irradiação incidente por  $m^2$ , dos  $1028 \text{ kWh}/m^2$  da Forma Inicial, com a operação de Normalização esse valor aumenta para  $1097 \text{ kWh}/m^2$ , com as operações de Rotação e Normalização aumenta apenas para  $1063 \text{ kWh}/m^2$  (mas é possível aumentar mais dependendo do ângulo de Rotação), e com as operações de Rotação, Normalização e Divisão (aplicando uma segunda Normalização à superfície dividida) aumenta para  $1098 \text{ kWh}/m^2$ . Relativamente às formas obtidas a partir de transformações operadas sobre uma das fachadas, a forma obtida a partir de uma operação de Normalização sobre uma das fachadas apresenta um desempenho de  $1054 \text{ kWh}/m^2$  e a forma obtida a partir de uma operação de Normalização sobre uma das fachadas e sobre a cobertura revela um desempenho de  $1089 \text{ kWh}/m^2$ . No que se refere à irradiação incidente total no envelope, dos  $460\,246 \text{ kWh}$  da Forma Inicial, com a operação de Normalização esse valor diminui para os  $394\,595 \text{ kWh}$ , com as operações de Rotação e Normalização esse valor diminui para os  $391\,743 \text{ kWh}$ , e com as operações de Rotação, Normalização e Divisão (aplicando uma segunda Normalização à superfície dividida) diminui para  $440\,131 \text{ kWh}$ . No que se refere às formas obtidas a partir de transformações operadas sobre uma das fachadas, a forma obtida a partir de uma operação de Normalização sobre uma das fachadas apresenta um desempenho de  $471\,541 \text{ kWh}$  (aumentando o desempenho da Forma Inicial) e a forma obtida a partir de uma operação de Normalização sobre uma das fachadas e sobre a cobertura revela um desempenho de  $454\,863 \text{ kWh}$ ;

- Quanto à forma dinâmica, visível na Figura 7.14, o valor de irradiação incidente por  $m^2$  aumenta relativamente à Forma Inicial, enquanto que o valor de irradiação incidente total diminui relativamente à Forma Inicial. Na irradiação incidente por  $m^2$ , dos  $1028 \text{ kWh}/m^2$  da Forma Inicial, aplicando as operações de Rotação e de Normalização (sendo a operação de Normalização de forma dinâmica ao longo do ano), obtém-se um valor de  $1063 \text{ kWh}/m^2$ . Na irradiação incidente total, dos  $460\,246 \text{ kWh}$  da Forma Inicial, aplicando as mesmas operações de Rotação e

<b>TIPOLOGIA T2</b> Formas Estáticas (Análise do Envelope e da Cobertura)	<b>Resultados</b>	<b>Operações e Posições do Sol</b>
<p>Forma Inicial</p> 	<p>Irradiação Total no Envelope: 460 246 kWh Irradiação por m<sup>2</sup> no Envelope: 1028 kWh/m<sup>2</sup> Área Total do Envelope: 625 m<sup>2</sup></p> <hr/> <p>Irradiação Total nas Superfícies da Cobertura: 228 768 kWh Irradiação por m<sup>2</sup> nas Superfícies da Cobertura: 1614 kWh/m<sup>2</sup> Área Total das Superfícies da Cobertura: 163 m<sup>2</sup></p>	<p>-----</p>
<p>Forma Normalizada</p> 	<p>Irradiação Total no Envelope: 394 595 kWh Irradiação por m<sup>2</sup> no Envelope: 1097 kWh/m<sup>2</sup> Área Total do Envelope: 407 m<sup>2</sup></p> <hr/> <p>Irradiação Total nas Superfícies da Cobertura: 244 263 kWh Irradiação por m<sup>2</sup> nas Superfícies da Cobertura: 1684 kWh/m<sup>2</sup> Área Total das Superfícies da Cobertura: 145 m<sup>2</sup></p>	<p>Operações:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Normalização</li> </ul> <p>Posições do Sol:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 5 de Junho às 13:00h</li> </ul>
<p>Forma Rodada e Normalizada</p> 	<p>Irradiação Total no Envelope: 391 743 kWh Irradiação por m<sup>2</sup> no Envelope: 1063 kWh/m<sup>2</sup> Área Total do Envelope: 366 m<sup>2</sup></p> <hr/> <p>Irradiação Total nas Superfícies da Cobertura: 240 424 kWh Irradiação por m<sup>2</sup> nas Superfícies da Cobertura: 1668 kWh/m<sup>2</sup> Área Total das Superfícies da Cobertura: 144 m<sup>2</sup></p>	<p>Operações:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Rotação 25°</li> <li>• Normalização</li> </ul> <p>Posições do Sol:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 5 de Junho às 13:00h</li> </ul>
<p>Forma Rodada, Dividida e Normalizada</p> 	<p>Irradiação Total no Envelope: 440 131 kWh Irradiação por m<sup>2</sup> no Envelope: 1098 kWh/m<sup>2</sup> Área Total do Envelope: 390 m<sup>2</sup></p> <hr/> <p>Irradiação Total nas Superfícies da Cobertura: 256 454 kWh Irradiação por m<sup>2</sup> nas Superfícies da Cobertura: 1735 kWh/m<sup>2</sup> Área Total das Superfícies da Cobertura: 148 m<sup>2</sup></p>	<p>Operações:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Rotação -20°</li> <li>• Divisão</li> <li>• Normalização</li> </ul> <p>Posições do Sol:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 16 de Maio às 13:00h</li> <li>• 21 de Julho às 12:00h</li> </ul>

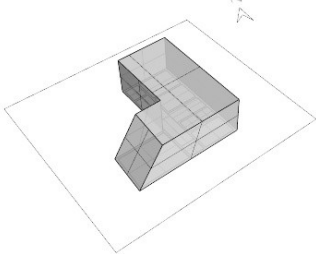
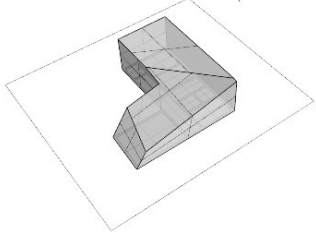
<p>Forma Normalizada em uma das Fachadas</p> 	<p>Irradiação Total no Envelope: 471 541 kWh Irradiação por m<sup>2</sup> no Envelope: 1054 kWh/m<sup>2</sup> Área Total do Envelope: 447 m<sup>2</sup></p>	<p>Operações:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Normalização</li> </ul> <p>Posições do Sol:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 25 de Março às 16:00h</li> </ul>
<p>Irradiação Total nas Superfícies da Cobertura: 214 380 kWh Irradiação por m<sup>2</sup> nas Superfícies da Cobertura: 1614 kWh/m<sup>2</sup> Área Total das Superfícies da Cobertura: 133 m<sup>2</sup></p>		
<p>Forma Normalizada em uma das Fachadas e na Cobertura</p> 	<p>Irradiação Total no Envelope: 454 863 kWh Irradiação por m<sup>2</sup> no Envelope: 1089 kWh/m<sup>2</sup> Área Total do Envelope: 417 m<sup>2</sup></p>	<p>Operações:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Normalização em uma das Fachadas</li> <li>• Normalização na Cobertura</li> </ul> <p>Posições do Sol:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 25 de Março às 16:00h</li> <li>• 5 de Junho às 13:00h</li> </ul>
<p>Irradiação Total nas Superfícies da Cobertura: 245 054 kWh Irradiação por m<sup>2</sup> nas Superfícies da Cobertura: 1685 kWh/m<sup>2</sup> Área Total das Superfícies da Cobertura: 145 m<sup>2</sup></p>		

Figura 7.13 : Tabela com os valores de irradiação incidente para as formas estáticas (Envelope e Cobertura) da tipologia T2.

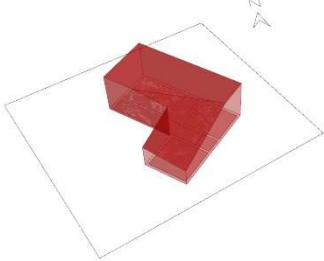
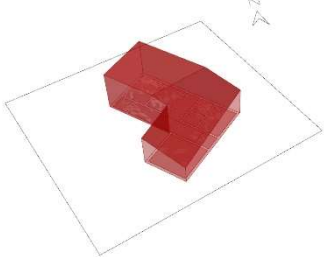
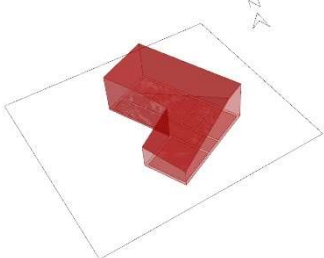
TIPOLOGIA T2 Forma Dinâmica	Resultados	Operações e Posições do Sol
<p>Forma 1</p> 	<p>Irradiação Total no Envelope da Forma 1: 222 440 kWh Irradiação por m<sup>2</sup> no Envelope da Forma 1: 541 kWh/m<sup>2</sup> Área do Envelope da Forma 1: 411 m<sup>2</sup></p>	<p>Período Temporal: • 1 de Janeiro às 00:00h a 21 de Junho às 12:00h Operações: • Rotação 25° • Normalização Posição do Sol: • 20 de Maio às 13:00h</p>
<p>Forma 2</p> 	<p>Irradiação Total no Envelope da Forma 2: 52 212 kWh Irradiação por m<sup>2</sup> no Envelope da Forma 2: 126 kWh/m<sup>2</sup> Área do Envelope da Forma 2: 415 m<sup>2</sup></p>	<p>Período Temporal: • 21 de Junho às 12:00h a 19 de Julho às 13:00h Operações: • Rotação 25° • Normalização Posição do Sol: • 21 de Junho às 12:00h</p>
<p>Forma 3</p> 	<p>Irradiação Total no Envelope da Forma 3: 162 474 kWh Irradiação por m<sup>2</sup> no Envelope da Forma 3: 396 kWh/m<sup>2</sup> Área do Envelope da Forma 3: 410 m<sup>2</sup></p>	<p>Período Temporal: • 19 de Julho às 13:00h a 31 de Dezembro às 24:00h Operações: • Rotação 25° • Normalização Posição do Sol: • 19 de Julho às 13:00h</p>
<p>Forma Total:  Forma 1 + Forma 2 + Forma 3</p>	<p>Irradiação Total no Envelope da Forma Total: 437 128 kWh Irradiação por m<sup>2</sup> no Envelope da Forma Total: 1063 kWh/m<sup>2</sup> Área média do Envelope da Forma Total: 412 m<sup>2</sup></p> <p>Irradiação Total nas Superfícies da Cobertura: 243 040 kWh Irradiação por m<sup>2</sup> nas Superfícies da Cobertura: 1679 kWh/m<sup>2</sup> Área média das Superfícies da Cobertura: 144 m<sup>2</sup></p>	<p>Período Temporal: • Totalidade do ano Operações: • Rotação 25° • Normalização Posições do Sol: • 20 de Maio às 13:00h • 21 de Junho às 12:00h • 19 de Julho às 13:00h</p>

Figura 7.14 : Tabela com os valores de irradiação incidente para as formas dinâmicas da tipologia T2.

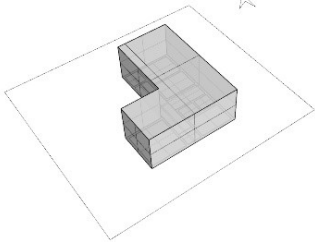
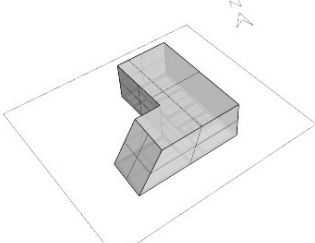
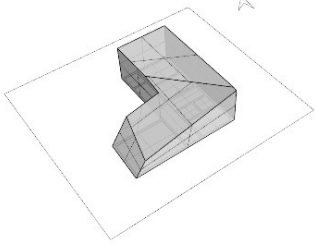
TIPOLOGIA T2 Formas Estáticas (Análise de uma Fachada)	Resultados	Operações e Posições do Sol
<p>Forma Inicial</p> 	<p>Irradiação Total na Superfície da Fachada Lateral Esquerda da Forma Inicial: 27 179 kWh</p> <p>Irradiação por m<sup>2</sup> na Superfície da Fachada Lateral Esquerda da Forma Inicial: 852 kWh/m<sup>2</sup></p> <p>Área Total da Superfície da Fachada Lateral Esquerda da Forma Inicial: 32 m<sup>2</sup></p>	<p>-----</p>
<p>Forma Normalizada em uma das Fachadas</p> 	<p>Irradiação Total na Superfície da Fachada Lateral Esquerda: 50 026 kWh</p> <p>Irradiação por m<sup>2</sup> na Superfície da Fachada Lateral Esquerda: 1312 kWh/m<sup>2</sup></p> <p>Área Total da Superfície da Fachada Lateral Esquerda: 38 m<sup>2</sup></p>	<p>Operações:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Normalização</li> </ul> <p>Posições do Sol:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 25 de Março às 16:00h</li> </ul>
<p>Forma Normalizada em uma das Fachadas e na Cobertura</p> 	<p>Irradiação Total na Superfície da Fachada Lateral Esquerda: 27 376 kWh</p> <p>Irradiação por m<sup>2</sup> na Superfície da Fachada Lateral Esquerda: 1310 kWh/m<sup>2</sup></p> <p>Área Total da Superfície da Fachada Lateral Esquerda: 21 m<sup>2</sup></p>	<p>Operações:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Normalização em uma das Fachadas</li> <li>• Normalização na Cobertura</li> </ul> <p>Posições do Sol:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 25 de Março às 16:00h</li> <li>• 5 de Junho às 13:00h</li> </ul>

Figura 7.15 : Tabela com os valores de irradiação incidente (Fachada Lateral Esquerda) para as formas estáticas da tipologia T2.

Normalização, esse valor diminui para os 437 128 kWh. É possível visualizar também na Figura 7.14 o contributo e a diferença do desempenho de cada umas das três formas que compõem a forma dinâmica, para os respetivos períodos temporais do ano em que essas formas compõem a forma do envelope dinâmico. A Forma 1 apresenta um desempenho de 541 kWh/m<sup>2</sup> na irradiação incidente por m<sup>2</sup> e de 222 440 kWh na irradiação incidente total, a Forma 2 um desempenho de 126 kWh/m<sup>2</sup> na irradiação incidente por m<sup>2</sup> e de 52 212 kWh na irradiação incidente total e a Forma 3 um desempenho de 396 kWh/m<sup>2</sup> na irradiação incidente por m<sup>2</sup> e de 162 474 kWh na irradiação incidente total. Importa contudo destacar o desempenho da totalidade da forma dinâmica, relativamente à forma estática rodada e normalizada, a qual serviu de base para a elaboração da forma dinâmica. A forma estática rodada e normalizada apresenta um desempenho de 1063 kWh/m<sup>2</sup> na irradiação incidente por m<sup>2</sup> e de 391 743 kWh na irradiação incidente total, enquanto que a forma dinâmica apresenta um desempenho de 1063 kWh/m<sup>2</sup> na irradiação incidente por m<sup>2</sup> e de 437 128 kWh na irradiação incidente total. Como tal, a forma dinâmica apresenta um desempenho semelhante na irradiação incidente por m<sup>2</sup> e um melhor desempenho na irradiação incidente total, comparativamente à forma estática rodada e normalizada. Assim, é útil utilizar uma forma dinâmica neste caso, quando se pretenda que os valores de irradiação incidente total sejam mais elevados;

- No que diz respeito à irradiação incidente nas superfícies da cobertura do envelope, ambos os valores de irradiação incidente aumentam. Nas formas estáticas os valores da irradiação incidente por m<sup>2</sup> e os valores da irradiação incidente total aumentam com as operações de Rotação (dependendo do ângulo de rotação), de Normalização (dependendo da posição do sol) e Divisão. Nos valores da irradiação incidente por m<sup>2</sup>, a Forma Inicial apresenta um valor de 1614 kWh/m<sup>2</sup>, com a operação de Normalização esse valor aumenta para 1684 kWh/m<sup>2</sup>, com as operações de Rotação e Normalização o valor aumenta para 1668 kWh/m<sup>2</sup> e com as operações de Rotação, Normalização e Divisão esse valor aumenta para 1735 kWh/m<sup>2</sup>. Relativamente às formas obtidas a partir de transformações operadas sobre uma das fachadas, a forma obtida a partir de uma

operação de Normalização obtém um valor de desempenho de 1614 kWh/m<sup>2</sup> e a forma obtida a partir de uma operação de Normalização sobre a mesma fachada e sobre a cobertura permite aumentar o valor do desempenho para 1685 kWh/m<sup>2</sup>. Nos valores de irradiação incidente total, a Forma Inicial apresenta um valor de 228 768 kWh, com a operação de Normalização esse valor aumenta para 244 263 kWh, com as operações de Rotação e Normalização aumenta para 240 424 kWh e com as operações de Rotação, Normalização e Divisão o valor aumenta para 256 454 kWh. No que diz respeito às formas obtidas a partir de transformações operadas sobre uma das fachadas, a forma obtida a partir de uma operação de Normalização sobre uma fachada obtém um valor de 214 380 kWh e a forma obtida a partir de uma operação de Normalização sobre a mesma fachada e sobre a cobertura permite aumentar o valor do desempenho para 245 054 kWh. No que se refere à forma dinâmica, também ambos os valores de irradiação incidente aumentam. Na Forma Inicial, os valores de irradiação incidente por m<sup>2</sup> de 1614 kWh/m<sup>2</sup> e de irradiação incidente total de 228 768 kWh aumentam, com as operações de Rotação e de Normalização (esta última feita de forma dinâmica), para os 1679 kWh/m<sup>2</sup> na irradiação incidente por m<sup>2</sup> e para os 243 040 kWh na irradiação incidente total, valores apresentados pela forma dinâmica. Também aqui é possível verificar o contributo das diferentes formas que compõem a forma dinâmica: a Forma 1 apresenta um desempenho de 862 kWh/m<sup>2</sup> na irradiação incidente por m<sup>2</sup> e de 125 086 kWh na irradiação incidente total, a Forma 2 um desempenho de 216 kWh/m<sup>2</sup> na irradiação incidente por m<sup>2</sup> e de 31 080 kWh na irradiação incidente total e a Forma 3 um desempenho de 599 kWh/m<sup>2</sup> na irradiação incidente por m<sup>2</sup> e de 86 875 kWh na irradiação incidente total;

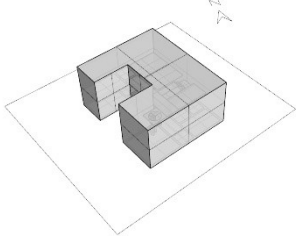
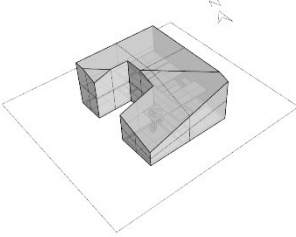
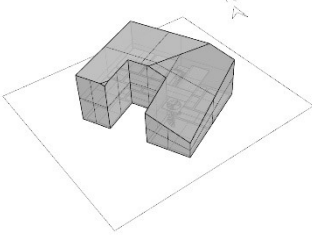
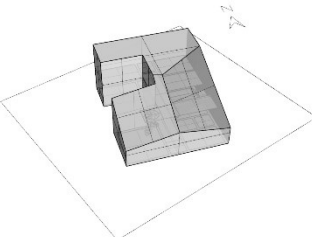
- No que se refere à análise que é feita à irradiação incidente na superfície de uma fachada, é possível verificar através da visualização da Figura 7.15, que a partir de um valor de irradiação incidente por m<sup>2</sup> de 852 kWh/m<sup>2</sup> e de um valor de irradiação incidente total de 27 179 kWh na fachada esquerda da Forma Inicial, com uma operação de Normalização sobre a fachada em análise é possível obter valores de irradiação incidente por m<sup>2</sup> de 1312 kWh/m<sup>2</sup> e de irradiação incidente total de 50 026

kWh, e com uma operação adicional de Normalização sobre a cobertura, é possível obter valores de irradiação incidente por  $m^2$  de  $1310 \text{ kWh}/m^2$  e de irradiação incidente total de  $27\,376 \text{ kWh}$ . Como tal, a operação de Normalização sobre fachadas também se revela benéfica para melhorar o desempenho da forma do envelope, no que diz respeito aos valores de irradiação incidente sobre o mesmo.

Apresentam-se também nas próximas páginas as Figuras 7.16, 7.17 e 7.18, onde são indicados para a moradia de tipologia T5 os valores da irradiação incidente total e os valores de irradiação incidente por metro quadrado para toda a forma do envelope, os valores de irradiação incidente total e os valores de irradiação incidente por metro quadrado para as superfícies da cobertura do envelope, e os valores de irradiação incidente total e os valores de irradiação incidente por metro quadrado para as superfícies da fachada analisada.

No que diz respeito aos valores de irradiação incidente obtidos para o envelope total da moradia de tipologia T5, visíveis nas Figuras 7.16, 7.17 e 7.18, é possível verificar que:

- São obtidos o mesmo tipo de resultados do que para a moradia de tipologia T2, ou seja, todos os valores de irradiação incidente aumentam, relativamente à Forma Inicial, com a aplicação das operações da gramática, com exceção do valor de irradiação incidente total no envelope, para a maioria das formas estáticas e para a forma dinâmica, o qual diminui;
- Nas formas estáticas, as operações de Rotação, Normalização e Divisão aumentam o valor da irradiação incidente no envelope por  $m^2$ , mas diminuem o valor da irradiação incidente total no envelope. Na irradiação incidente por  $m^2$ , dos  $978 \text{ kWh}/m^2$  da Forma Inicial, com a operação de Normalização esse valor aumenta para  $1019 \text{ kWh}/m^2$ , com as operações de Rotação e Normalização aumenta para  $1027 \text{ kWh}/m^2$ , e com as operações de Rotação, Normalização e Divisão (aplicando uma segunda Normalização à superfície dividida) aumenta para  $1034 \text{ kWh}/m^2$ .

TIPOLOGIA T5 Formas Estáticas	Resultados	Operações e Posições do Sol
<p>Forma Inicial</p> 	<p>Irradiação Total no Envelope: 612 199 kWh Irradiação por m<sup>2</sup> no Envelope: 978 kWh/m<sup>2</sup> Área Total do Envelope: 625 m<sup>2</sup></p> <hr/> <p>Irradiação Total nas Superfícies da Cobertura: 262 985 kWh Irradiação por m<sup>2</sup> nas Superfícies da Cobertura: 1614 kWh/m<sup>2</sup> Área Total das Superfícies da Cobertura: 163 m<sup>2</sup></p>	<p>-----</p>
<p>Forma Normalizada</p> 	<p>Irradiação Total no Envelope: 576 716 kWh Irradiação por m<sup>2</sup> no Envelope: 1019 kWh/m<sup>2</sup> Área Total do Envelope: 566 m<sup>2</sup></p> <hr/> <p>Irradiação Total nas Superfícies da Cobertura: 289 958 kWh Irradiação por m<sup>2</sup> nas Superfícies da Cobertura: 1706 kWh/m<sup>2</sup> Área Total das Superfícies da Cobertura: 170 m<sup>2</sup></p>	<p>Operações:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Normalização</li> </ul> <p>Posições do Sol:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 1 de Maio às 13:00h</li> </ul>
<p>Forma Rodada e Normalizada</p> 	<p>Irradiação Total no Envelope: 577 739 kWh Irradiação por m<sup>2</sup> no Envelope: 1027 kWh/m<sup>2</sup> Área Total do Envelope: 563 m<sup>2</sup></p> <hr/> <p>Irradiação Total nas Superfícies da Cobertura: 295 461 kWh Irradiação por m<sup>2</sup> nas Superfícies da Cobertura: 1728 kWh/m<sup>2</sup> Área Total das Superfícies da Cobertura: 171 m<sup>2</sup></p>	<p>Operações:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Rotação 25°</li> <li>• Normalização</li> </ul> <p>Posições do Sol:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 2 de Maio às 12:00h</li> </ul>
<p>Forma Rodada, Dividida e Normalizada</p> 	<p>Irradiação Total no Envelope: 558 467 kWh Irradiação por m<sup>2</sup> no Envelope: 1034 kWh/m<sup>2</sup> Área Total do Envelope: 540 m<sup>2</sup></p> <hr/> <p>Irradiação Total nas Superfícies da Cobertura: 305 683 kWh Irradiação por m<sup>2</sup> nas Superfícies da Cobertura: 1747 kWh/m<sup>2</sup> Área Total das Superfícies da Cobertura: 175 m<sup>2</sup></p>	<p>Operações:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Rotação -20°</li> <li>• Divisão</li> <li>• Normalização</li> </ul> <p>Posições do Sol:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 17 de Abril às 13:00h</li> <li>• 31 de Julho às 11:00h</li> </ul>

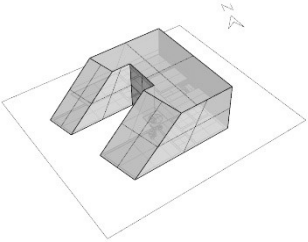
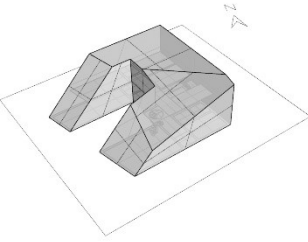
<p>Forma Normalizada em uma das Fachadas</p> 	<p>Irradiação Total no Envelope: 642 698 kWh Irradiação por m<sup>2</sup> no Envelope: 1033 kWh/m<sup>2</sup> Área Total do Envelope: 621 m<sup>2</sup></p>	<p>Operações:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Normalização</li> </ul> <p>Posições do Sol:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 25 de Março às 15:00h</li> </ul>
<p>Irradiação Total nas Superfícies da Cobertura: 207 669 kWh Irradiação por m<sup>2</sup> nas Superfícies da Cobertura: 1614 kWh/m<sup>2</sup> Área Total das Superfícies da Cobertura: 129 m<sup>2</sup></p>		
<p>Forma Normalizada em uma das Fachadas e na Cobertura</p> 	<p>Irradiação Total no Envelope: 628 922 kWh Irradiação por m<sup>2</sup> no Envelope: 1059 kWh/m<sup>2</sup> Área Total do Envelope: 595 m<sup>2</sup></p>	<p>Operações:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Normalização</li> </ul> <p>Posições do Sol:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 25 de Março às 15:00h</li> <li>• 1 de Maio às 13:00h</li> </ul>
<p>Irradiação Total nas Superfícies da Cobertura: 259 676 kWh Irradiação por m<sup>2</sup> nas Superfícies da Cobertura: 1697 kWh/m<sup>2</sup> Área Total das Superfícies da Cobertura: 153 m<sup>2</sup></p>		

Figura 7.16 : Tabela com os valores de irradiação incidente para as formas estáticas (Envelope e Cobertura) da tipologia T5.

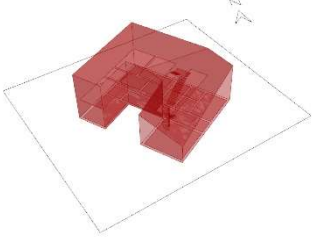
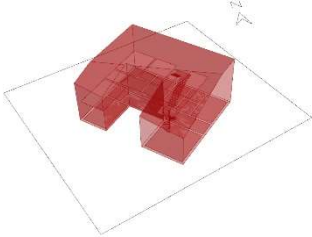
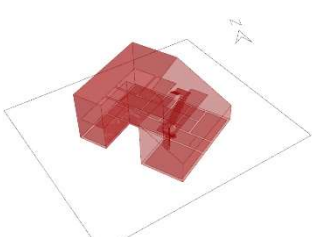
TIPOLOGIA T5 Forma Dinâmica	Resultados	Operações e Posições do Sol
<p>Forma 1</p> 	<p>Irradiação Total no Envelope da Forma 1: 302 665 kWh                      Irradiação por m<sup>2</sup> no Envelope da Forma 1: 535 kWh/m<sup>2</sup>                      Área do Envelope da Forma 1: 566 m<sup>2</sup></p>	<p>Período Temporal:                      • 1 de Janeiro às 00:00h                      a 3 de Julho às 13:00h</p> <p>Operações:                      • Rotação 25°                      • Normalização</p> <p>Posição do Sol:                      • 7 de Maio às 12:00h</p>
<p>Forma 2</p> 	<p>Irradiação Total no Envelope da Forma 2: 68 337 kWh                      Irradiação por m<sup>2</sup> no Envelope da Forma 2: 119 kWh/m<sup>2</sup>                      Área do Envelope da Forma 2: 585 m<sup>2</sup></p>	<p>Período Temporal:                      • 3 de Julho às 13:00h                      a 21 de Julho às 11:00h</p> <p>Operações:                      • Rotação 25°                      • Normalização</p> <p>Posição do Sol:                      • 3 de Julho às 13:00h</p>
<p>Forma 3</p> 	<p>Irradiação Total no Envelope da Forma 3: 217 442 kWh                      Irradiação por m<sup>2</sup> no Envelope da Forma 3: 387 kWh/m<sup>2</sup>                      Área do Envelope da Forma 3: 548 m<sup>2</sup></p>	<p>Período Temporal:                      • 21 de Julho às 11:00h                      a 31 de Dezembro às 24:00h</p> <p>Operações:                      • Rotação 25°                      • Normalização</p> <p>Posição do Sol:                      • 21 de Julho às 11:00h</p>
<p>Forma Total:                       Forma 1                      +                      Forma 2                      +                      Forma 3</p>	<p>Irradiação Total no Envelope da Forma Total: 588 444 kWh                      Irradiação por m<sup>2</sup> no Envelope da Forma Total: 1042 kWh/m<sup>2</sup>                      Área média do Envelope da Forma Total: 566 m<sup>2</sup></p> <p>Irradiação Total nas Superfícies da Cobertura: 302 484 kWh                      Irradiação por m<sup>2</sup> nas Superfícies da Cobertura: 1783 kWh/m<sup>2</sup>                      Área média das Superfícies da Cobertura: 171 m<sup>2</sup></p>	<p>Período Temporal:                      • Totalidade do ano</p> <p>Operações:                      • Rotação 25°                      • Normalização</p> <p>Posições do Sol:                      • 7 de Maio às 12:00h                      • 3 de Julho às 13:00h                      • 21 de Julho às 11:00h</p>

Figura 7.17 : Tabela com os valores de irradiação incidente para as formas dinâmicas da tipologia T5.

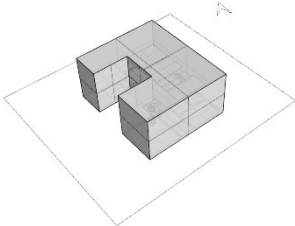
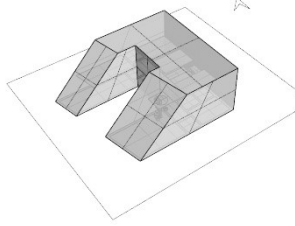
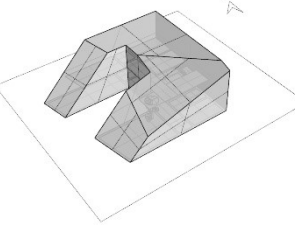
TIPOLOGIA T5 Formas Estáticas	Resultados	Operações e Posições do Sol
<p>Forma Inicial</p> 	<p>Irradiação Total na Superfície da Fachada Lateral Esquerda da Forma Inicial: 58 407 kWh</p> <p>Irradiação por m<sup>2</sup> na Superfície da Fachada Lateral Esquerda da Forma Inicial: 851 kWh/m<sup>2</sup></p> <p>Área Total da Superfície da Fachada Lateral Esquerda da Forma Inicial: 69 m<sup>2</sup></p>	<p>-----</p>
<p>Forma Normalizada em uma das Fachadas</p> 	<p>Irradiação Total na Superfície da Fachada Lateral Esquerda: 148 500 kWh</p> <p>Irradiação por m<sup>2</sup> na Superfície da Fachada Lateral Esquerda: 1536 kWh/m<sup>2</sup></p> <p>Área Total da Superfície da Fachada Lateral Esquerda: 97 m<sup>2</sup></p>	<p>Operações:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Normalização</li> </ul> <p>Posições do Sol:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 25 de Março às 16:00h</li> </ul>
<p>Forma Normalizada em uma das Fachadas e na Cobertura</p> 	<p>Irradiação Total na Superfície da Fachada Lateral Esquerda: 108 274 kWh</p> <p>Irradiação por m<sup>2</sup> na Superfície da Fachada Lateral Esquerda: 1536 kWh/m<sup>2</sup></p> <p>Área Total da Superfície da Fachada Lateral Esquerda: 71 m<sup>2</sup></p>	<p>Operações:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Normalização em uma das Fachadas</li> <li>• Normalização na Cobertura</li> </ul> <p>Posições do Sol:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 25 de Março às 16:00h</li> <li>• 5 de Junho às 13:00h</li> </ul>

Figura 7.18 : Tabela com os valores de irradiação incidente (Fachada Lateral Esquerda) para as formas estáticas da tipologia T5.

Relativamente às formas obtidas a partir de transformações operadas sobre uma das fachadas, a forma obtida a partir de uma operação de Normalização obtém um valor de desempenho, para a totalidade do envelope, de 1033 kWh/m<sup>2</sup> e a forma obtida a partir de uma operação de Normalização sobre a mesma fachada e sobre a cobertura permite aumentar o valor do desempenho para 1059 kWh/m<sup>2</sup>. No que se refere à irradiação incidente total no envelope, dos 612 199 kWh da Forma Inicial, com a operação de Normalização esse valor diminui para os 576 716 kWh, com as operações de Rotação e Normalização esse valor diminui para os 577 739 kWh, e com as operações de Rotação, Normalização e Divisão (aplicando uma segunda Normalização à superfície dividida) diminui para 558 467 kWh. No que diz respeito às formas obtidas a partir de transformações operadas sobre uma das fachadas, a forma obtida a partir de uma operação de Normalização sobre uma fachada obtém um valor de irradiação incidente total, para a totalidade do envelope, de 642 698 kWh e a forma obtida a partir de uma operação de Normalização sobre a mesma fachada e sobre a cobertura permite aumentar o valor do desempenho para 628 922 kWh;

- Na forma dinâmica, também o valor de irradiação incidente no envelope por m<sup>2</sup> aumenta e o valor de irradiação incidente total diminui. Na irradiação incidente por m<sup>2</sup>, dos 978 kWh/m<sup>2</sup> da Forma Inicial, aplicando as operações de Rotação e de Normalização (sendo a operação de Normalização de forma dinâmica ao longo do ano), obtém-se um valor de 1042 kWh/m<sup>2</sup>. Na irradiação incidente total, dos 612 199 kWh da Forma Inicial, aplicando as mesmas operações de Rotação e Normalização, esse valor diminui para os 588 444 kWh. Como tal, a forma dinâmica obtém um melhor desempenho, relativamente à maior parte das formas estáticas, para os valores de irradiação incidente por m<sup>2</sup> na totalidade do envelope, sendo contudo o seu valor de irradiação incidente total inferior, tal como a maior parte das formas estáticas transformadas, ao da forma inicial. No que diz respeito ao contributo das diferentes formas que compõem a forma dinâmica, a Forma 1 apresenta um desempenho de 535 kWh/m<sup>2</sup> na irradiação incidente por m<sup>2</sup> e de 302 665 kWh na irradiação incidente total, a Forma 2 um desempenho de 119 kWh/m<sup>2</sup> na irradiação incidente por m<sup>2</sup>

e de 68 337 kWh na irradiação incidente total e a Forma 3 um desempenho de 387 kWh/m<sup>2</sup> na irradiação incidente por m<sup>2</sup> e de 217 442 kWh na irradiação incidente total. Valores estes referentes ao desempenho para a totalidade do envelope;

- No que diz respeito à irradiação incidente nas superfícies da cobertura do envelope, a maior parte dos valores de irradiação incidente aumentam. Nas formas estáticas os valores da irradiação incidente por m<sup>2</sup> e os valores da irradiação incidente total aumentam com as operações de Rotação (dependendo do ângulo de rotação), de Normalização (dependendo da posição do sol) e de Divisão. Nos valores da irradiação incidente por m<sup>2</sup>, a Forma Inicial apresenta um valor de 1614 kWh/m<sup>2</sup>, com a operação de Normalização esse valor aumenta para 1706 kWh/m<sup>2</sup>, com as operações de Rotação e Normalização o valor aumenta para 1728 kWh/m<sup>2</sup> e com as operações de Rotação, Normalização e Divisão esse valor aumenta para 1747 kWh/m<sup>2</sup>. Relativamente às formas obtidas a partir de transformações operadas sobre uma das fachadas, a forma obtida a partir de uma operação de Normalização obtém um valor de desempenho, para a cobertura, de 1614 kWh/m<sup>2</sup> e a forma obtida a partir de uma operação de Normalização sobre a mesma fachada e sobre a cobertura permite aumentar o valor do desempenho para 1697 kWh/m<sup>2</sup>. Nos valores de irradiação incidente total, a Forma Inicial apresenta um valor de 262 985 kWh, com a operação de Normalização esse valor aumenta para 289 958 kWh, com as operações de Rotação e Normalização aumenta para 295 461 kWh e com as operações de Rotação, Normalização e Divisão o valor aumenta para 305 683 kWh. No que diz respeito às formas obtidas a partir de transformações operadas sobre uma das fachadas, a forma obtida a partir de uma operação de Normalização sobre uma fachada obtém um valor, para a cobertura, de 207 669 kWh e a forma obtida a partir de uma operação de Normalização sobre a mesma fachada e sobre a cobertura permite aumentar o valor do desempenho para 259 676 kWh. No que se refere à forma dinâmica, ambos os valores de irradiação incidente aumentam. Na Forma Inicial, os valores de irradiação incidente por m<sup>2</sup> de 1614 kWh/m<sup>2</sup> e de irradiação incidente total de 262 985 kWh aumentam, com as operações de Rotação

e de Normalização (esta última feita de forma dinâmica), para os 1783 kWh/m<sup>2</sup> na irradiação incidente por m<sup>2</sup> e para os 302 484 kWh na irradiação incidente total. Quanto ao contributo das diferentes formas que compõem a forma dinâmica, a Forma 1 apresenta um desempenho de 934 kWh/m<sup>2</sup> na irradiação incidente por m<sup>2</sup> e de 158 910 kWh na irradiação incidente total, a Forma 2 um desempenho de 218 kWh/m<sup>2</sup> na irradiação incidente por m<sup>2</sup> e de 36 415 kWh na irradiação incidente total e a Forma 3 um desempenho de 630 kWh/m<sup>2</sup> na irradiação incidente por m<sup>2</sup> e de 107 161 kWh na irradiação incidente total;

- No que se refere à análise que é feita à irradiação incidente na superfície de uma fachada, é possível verificar através da visualização da Figura 7.18, que a partir de um valor de irradiação incidente por m<sup>2</sup> de 851 kWh/m<sup>2</sup> e de um valor de irradiação incidente total de 58 407 kWh na fachada esquerda da Forma Inicial, com uma operação de Normalização sobre a fachada em análise é possível obter valores de irradiação incidente por m<sup>2</sup> de 1536 kWh/m<sup>2</sup> e de irradiação incidente total de 148 500 kWh, e com uma operação adicional de Normalização sobre a cobertura, é possível obter valores de irradiação incidente por m<sup>2</sup> de 1536 kWh/m<sup>2</sup> e de irradiação incidente total de 108 274 kWh. Como tal, a operação de Normalização sobre fachadas também se revela benéfica para melhorar o desempenho da forma do envelope, no que diz respeito aos valores de irradiação incidente sobre o mesmo.

Assim, através dos resultados obtidos no projeto do envelope das moradias de tipologias T2 e T5 (projeto ao nível da conceção de formas gerais para o envelope), é possível confirmar as observações feitas aquando da elaboração da gramática para o envelope de edifícios (ver Capítulo 5: Gramática do Envelope de Edifícios). Ou seja:

- As operações de transformação de forma da gramática (Rotação, Normalização e Divisão) são válidas para melhorar o desempenho energético do envelope do edifício, validando desse modo a própria gramática do envelope de edifícios. Assumem um destaque especial as operações de Rotação e de Normalização, pois estas influenciam de

modo direto o desempenho energético da forma do envelope. A operação de Divisão influencia de um modo menos direto pois serve de suporte para a aplicação das operações de Rotação e Normalização;

- A operação de Normalização provoca um maior impacto do que a operação de Rotação no desempenho energético do envelope, quer no que diz respeito aos valores de irradiação incidente total quer no que diz respeito aos valores de irradiação incidente por metro quadrado. Ambos os valores aumentam de modo mais significativo com a operação de Normalização;
- Diferentes sequências das operações de Rotação, Normalização e Divisão geram diferentes formas e desempenhos energéticos para o envelope de edifícios. Como tal, é válida a exploração criativa de diferentes sequências de operações para a elaboração da forma do envelope dos edifícios, tendo como critérios o desempenho energético e as intenções estéticas do utilizador da gramática. O utilizador pode assim livremente e de um modo criativo elaborar algoritmos para o envelope dos edifícios que projeta.

Merecem também destaque os resultados obtidos para as formas dinâmicas. Estas revelam um bom desempenho em todos os valores de irradiação incidente, comparativamente às formas estáticas. Principalmente a forma dinâmica elaborada para a moradia de tipologia T5, a qual obtém melhores valores de desempenho, para ambos os valores de irradiação, relativamente à maior parte das formas estáticas. É também provável que sendo avaliado o desempenho das formas dinâmicas para mais do que três formas e três períodos de tempo que compõem essas mesmas formas dinâmicas, o desempenho destas melhora e supere o desempenho obtido por todas ou pela maior parte das formas estáticas analisadas.

Importa de igual modo salientar que a Gramática do Envelope de Edifícios permite realizar mais operações de transformação ao envelope de um edifício, nomeadamente operações de rotação, normalização e divisão, do que aquelas que foram realizadas para o presente caso de estudo do projeto do envelope de

duas tipologias de moradias unifamiliares. É possível realizar, por exemplo, mais do que duas operações de normalização, podendo a operação de normalização ser também aplicada a todas as superfícies das fachadas do envelope de um edifício. Aplicando um maior número de operações, poder-se-á provavelmente obter soluções com um melhor desempenho energético. Limitou-se o número de operações aplicadas no presente caso de estudo do projeto do envelope de duas tipologias de moradias unifamiliares, de modo a procurar obter formas com bom desempenho que fossem o mais simples possível do ponto de vista da sua configuração formal. Ou seja, procurou-se maximizar o desempenho para formas simples de envelopes de moradias unifamiliares, tendo em conta que a simplicidade pode ser uma mais valia para o desempenho do envelope e de que a complexidade não é obrigatória para obter soluções formais com bom desempenho energético para o envelope. Para a elaboração de formas de maior nível de complexidade, é necessário desenvolver mais o protótipo LIDIA, sendo também necessário mais tempo para a execução desse desenvolvimento. Pretende-se realizar esse desenvolvimento, quer do protótipo LIDIA, quer do nível de complexidade formal das soluções para o envelope de uma moradia unifamiliar, numa fase futura da presente investigação.

De modo a se ter uma noção dos valores de energia elétrica que podem ser obtidos através dos valores de irradiação solar incidente nas soluções formais elaboradas para o envelope das moradias em estudo, na Figura 7.19 apresenta-se uma conversão dos valores de irradiação incidente total para as superfícies da cobertura, aplicando uma taxa de eficiência de 22,2%, valor indicado para a eficiência dos painéis fotovoltaicos com melhor desempenho no mercado português no ano de 2018 (Reis 2018).

Assim, são apresentadas para as moradias de tipologias T2 e T5, as estimativas do “Valor de energia elétrica gerada”, aplicando uma taxa de eficiência de 22,2%, e também as estimativas do “Valor de consumo de energia elétrica”, de modo a se poder comparar a quantidade de energia gerada com a quantidade de energia consumida, ao longo do período de um ano, para a Forma Inicial, para a Forma Normalizada, para a Forma Rodada e Normalizada, para a Forma Rodada,

Dividida e Normalizada, para a Forma Dinâmica, para a Forma Normalizada em uma das Fachadas e para a Forma Normalizada em uma das Fachadas e na

TIPOLOGIA T2 (Coberturas)	Valor de energia elétrica gerada	Valor de consumo de energia elétrica	Ganho energético relativo à Forma Inicial
Forma Inicial	50 787 kWh/ano	4 878 kWh/ano	-----
Forma Normalizada	54 226 kWh/ano	4 878 kWh/ano	+3439 kWh/ano +6,8%
Forma Rodada e Normalizada	53 374 kWh/ano	4 878 kWh/ano	+2587 kWh/ano +5,1%
Forma Rodada, Dividida e Normalizada	56 933 kWh/ano	4 878 kWh/ano	+6146 kWh/ano +12,1%
Forma Dinâmica	53 955 kWh/ano	4 878 kWh/ano	+3168 kWh/ano +6,2%
Forma Normalizada em uma das Fachadas	47 592 kWh/ano	4 878 kWh/ano	-3195 kWh/ano -6,3%
Forma Normalizada em uma das Fachadas e na Cobertura	54 402 kWh/ano	4 878 kWh/ano	+3615 kWh/ano +7,1%
TIPOLOGIA T5 (Coberturas)	Valor de energia elétrica gerada	Valor de consumo de energia elétrica	Ganho energético relativo à Forma Inicial
Forma Inicial	58 383 kWh/ano	8 537 kWh/ano	-----
Forma Normalizada	66 102 kWh/ano	8 537 kWh/ano	+7719 kWh/ano +13,2%
Forma Rodada e Normalizada	65 738 kWh/ano	8 537 kWh/ano	+7355 kWh/ano +12,6%
Forma Rodada, Dividida e Normalizada	67 883 kWh/ano	8 537 kWh/ano	+9500 kWh/ano +16,3%
Forma Dinâmica	67 152 kWh/ano	8 537 kWh/ano	+8769 kWh/ano +15%
Forma Normalizada em uma das Fachadas	46 103 kWh/ano	8 537 kWh/ano	-12280 kWh/ano -21%
Forma Normalizada em uma das Fachadas e na Cobertura	57 648 kWh/ano	8 537 kWh/ano	-735 kWh/ano -1,3%

Figura 7.19 : Tabela com o “Valor de energia elétrica gerada”, o “Valor de consumo de energia elétrica” e o “Ganho energético relativo à Forma Inicial”, nas superfícies das coberturas das moradias de tipologias T2 e T5.

Cobertura. É apresentado também o “Ganho energético relativo à Forma Inicial”, dessas mesmas formas.

A estimativa do valor de consumo de energia elétrica é calculada tendo como base o valor de consumo doméstico de energia elétrica *per capita* (por pessoa) indicado pela Base de Dados Portugal Contemporâneo PORDATA. Para o ano de 2017, o ano mais recente para o qual são indicados valores de consumo, é indicado um valor de 1 219,6 kWh/ano por pessoa (PORDATA, 2019). Considerando um número de 4 pessoas como habitantes para a moradia de tipologia T2 (2 pessoas por quarto) e um número de 7 pessoas como habitantes para a moradia de tipologia T5 (2 pessoas em 2 dos quartos e 1 pessoa em cada um de 3 quartos), obtêm-se os seguintes valores de consumo: 4 878 kWh/ano para a moradia de tipologia T2 e 8 537 kWh/ano para a moradia de tipologia T5. É possível constatar que os valores de energia elétrica gerados nas superfícies da cobertura excedem consideravelmente as estimativas de consumo de energia elétrica, para ambas as tipologias. Isto é válido para todas as formas projetadas, inclusive para a Forma Inicial das tipologias. Verifica-se também que a maior parte das operações de transformação de forma da cobertura das moradias de tipologias T2 e T5 aumentam o “Valor de energia elétrica gerada” nas coberturas das moradias, relativamente à cobertura presente na Forma Inicial.

Na tipologia T2, relativamente à Forma Inicial, o ganho energético aumentou na Forma Normalizada em 6,8% (+ 3439 kWh/ano), na Forma Rodada e Normalizada em 5,1% (+2857 kWh/ano), na Forma Rodada, Dividida e Normalizada em 12,1% (+6146 kWh/ano), na Forma Dinâmica em 6,2% (+3168 kWh/ano) e na Forma Normalizada em uma das Fachadas e na Cobertura em 7,1% (+3615 kWh/ano). Diminuindo no entanto, no que diz respeito à Forma Normalizada em uma das Fachadas, em -6,3% (-3195 kWh/ano).

Na tipologia T5, relativamente à Forma Inicial, o ganho energético aumentou na Forma Normalizada em 13,2% (+7719 kWh/ano), na Forma Rodada e Normalizada em 12,6% (+7355 kWh/ano), na Forma Rodada, Dividida e Normalizada em 16,3% (+9500 kWh/ano), e na Forma Dinâmica em 15% (+8769 kWh/ano). Diminuindo no entanto, no que diz respeito à Forma Normalizada em

uma das Fachadas, em -21% (-12280 kWh/ano), e à Forma Normalizada em uma das Fachadas e na Cobertura, em -1,3% (-735 kWh/ano).

Em ambas as tipologias, a Forma Rodada, Dividida e Normalizada, é a que apresenta um maior aumento do valor de ganho energético relativamente à Forma Inicial, um aumento de 12,1% (+6146 kWh/ano) na tipologia T2 e um aumento de 16,3% (+9500 kWh/ano) na tipologia T5.

Interessa contudo referir que a Forma Dinâmica elaborada para as tipologias T2 e T5 foi realizada tendo como base a Forma Rodada e Normalizada. Em ambas as tipologias, a Forma Dinâmica aumentou os ganhos energéticos relativamente à Forma Rodada e Normalizada. Na tipologia T2, o aumento da Forma Rodada e Normalizada, relativamente à Forma Inicial, foi de 5,1% (+2857 kWh/ano), tendo o aumento da Forma Dinâmica sido de 6,2% (+3168 kWh/ano). Na tipologia T5, o aumento da Forma Rodada e Normalizada, relativamente à Forma Inicial, foi de 12,6% (+7355 kWh/ano), tendo o aumento da Forma Dinâmica sido de 15% (+8769 kWh/ano). Se for elaborada uma Forma Dinâmica, para as tipologias T2 e T5, tendo como base a Forma Rodada, Dividida e Normalizada, é de esperar que os valores da Forma Dinâmica sejam mais elevados do que os da Forma Rodada, Dividida e Normalizada. Pretende-se efetuar essa análise numa futura fase da presente investigação.

É possível verificar também, por meio da visualização da Figura 7.20, que as formas obtidas para os envelopes das moradias, através da transformação de uma das fachadas, permitem aumentar também o “Ganho energético relativo à Forma Inicial”, ou seja, permitem aumentar os valores de energia elétrica gerada na fachada lateral esquerda da forma inicial das tipologias T2 e T5.

Na tipologia T2, a Forma Normalizada em uma das Fachadas apresenta um ganho de 84,1% (+5072 kWh/ano), e a Forma Normalizada em uma das Fachadas e na Cobertura um ganho de 0,7% (+44 kWh/ano), relativamente à Forma Inicial. Na tipologia T5, a Forma Normalizada em uma das Fachadas apresenta um ganho de 154,3% (+20 001 kWh/ano), e a Forma Normalizada em uma das Fachadas e na Cobertura um ganho de 85,4% (+11 071 kWh/ano),

relativamente à Forma Inicial. Assim, é possível constatar que percentualmente, os ganhos energéticos são em geral superiores com as transformações operadas na fachada, comparativamente às transformações operadas na cobertura. A Forma Normalizada em uma das Fachadas e a Forma Normalizada em uma das Fachadas e na Cobertura, para as tipologias T2 e T5, apresentam percentagens bastante superiores às formas avaliadas para a cobertura (ver Figura 7.19), com exceção da Forma Normalizada em uma das Fachadas e na Cobertura, da tipologia T2, a qual apresenta um ganho percentual de apenas 0,7%.

TIPOLOGIA T2 (Fachada)	Valor de energia elétrica gerada	Valor de consumo de energia elétrica	Ganho energético relativo à Forma Inicial
Forma Inicial	6 034 kWh/ano	4 878 kWh/ano	-----
Forma Normalizada em uma das Fachadas	11 106 kWh/ano	4 878 kWh/ano	+5 072 kWh/ano +84,1%
Forma Normalizada em uma das Fachadas e na Cobertura	6 078 kWh/ano	4 878 kWh/ano	+44 kWh/ano +0,7%
TIPOLOGIA T5 (Fachada)	Valor de energia elétrica gerada	Valor de consumo de energia elétrica	Ganho energético relativo à Forma Inicial
Forma Inicial	12 966 kWh/ano	8 537 kWh/ano	-----
Forma Normalizada em uma das Fachadas	32 967 kWh/ano	8 537 kWh/ano	+20 001 kWh/ano +154,3%
Forma Normalizada em uma das Fachadas e na Cobertura	24 037 kWh/ano	8 537 kWh/ano	+11 071 kWh/ano +85,4%

Figura 7.20 : Tabela com o “Valor de energia elétrica gerada”, o “Valor de consumo de energia elétrica” e o “Ganho energético relativo à Forma Inicial”, nas superfícies das fachadas laterais esquerdas das moradias de tipologias T2 e T5.

É possível verificar também que a aplicação das transformações da Gramática do Envelope de Edifícios são particularmente pertinentes para a melhoria da eficiência de geração de energia elétrica por metro quadrado de superfície, quer a superfície da cobertura, quer a superfície da fachada lateral esquerda dos

envelopes. Assim, aplicando as transformações da gramática, é possível gerar a energia estimada para o consumo no edifício, com menos metros quadrados de superfície do envelope ocupada por tecnologia fotovoltaica (painéis fotovoltaicos).

TIPOLOGIA T2 (Coberturas)	Área fotovoltaica necessária
Forma Inicial	13,61 m <sup>2</sup>
Forma Normalizada	13,05 m <sup>2</sup>
Forma Rodada e Normalizada	13,17 m <sup>2</sup>
Forma Rodada, Dividida e Normalizada	12,67 m <sup>2</sup>
Forma Dinâmica	13,09 m <sup>2</sup>
Forma Normalizada em uma das Fachadas	13,61 m <sup>2</sup>
Forma Normalizada em uma das Fachadas e na Cobertura	12,95 m <sup>2</sup>
TIPOLOGIA T5 (Coberturas)	Área fotovoltaica necessária
Forma Inicial	23,83 m <sup>2</sup>
Forma Normalizada	22,54 m <sup>2</sup>
Forma Rodada e Normalizada	22,25 m <sup>2</sup>
Forma Rodada, Dividida e Normalizada	22,01 m <sup>2</sup>
Forma Dinâmica	21,57 m <sup>2</sup>
Forma Normalizada em uma das Fachadas	23,83 m <sup>2</sup>
Forma Normalizada em uma das Fachadas e na Cobertura	22,66 m <sup>2</sup>

Figura 7.21 : Tabela com as áreas de tecnologia fotovoltaica (eficiência de 22,2%) necessárias, na cobertura, para a geração da energia estimada para o consumo nas moradias de tipologias T2 e T5.

A Figura 7.21 mostra os valores de área necessária nas superfícies das coberturas dos envelopes para gerar a energia estimada para o consumo. Isto

para todas as formas obtidas com as transformações da gramática, bem como para as formas iniciais, de ambas as tipologias de moradias. Conforme se verifica, com a aplicação das transformações da gramática, a área que é necessário ser coberta por painéis fotovoltaicos diminui. Fazendo com que diminua também o custo monetário aplicado na aquisição de painéis fotovoltaicos, para a sua colocação no envelope das moradias em estudo, bem como o custo monetário total necessário para a construção das moradias. As formas dos envelopes que apresentam uma menor área fotovoltaica necessária são, na tipologia T2, a Forma Rodada, Dividida e Normalizada, a Forma Normalizada em uma das Fachadas e na Cobertura, e a Forma Normalizada, enquanto que na tipologia T5 são a Forma Dinâmica, a Forma Rodada, Dividida e Normalizada, e a Forma Rodada e Normalizada.

No que diz respeito ao cálculo da área de painéis fotovoltaicos necessária para a fachada lateral esquerda do envelope, complementando o cálculo que é feito relativamente à cobertura, este é apresentado na Figura 7.22. É possível verificar que as formas transformadas, da fachada lateral esquerda do envelope, apresentam também menores áreas necessárias para a aplicação de tecnologia

TIPOLOGIA T2 (Fachada)	Área fotovoltaica necessária
Forma Inicial	45,14 m <sup>2</sup>
Forma Normalizada em uma das Fachadas	29,31 m <sup>2</sup>
Forma Normalizada em uma das Fachadas e na Cobertura	29,36 m <sup>2</sup>
TIPOLOGIA T5 (Fachada)	Área fotovoltaica necessária
Forma Inicial	45,19 m <sup>2</sup>
Forma Normalizada em uma das Fachadas	25,04 m <sup>2</sup>
Forma Normalizada em uma das Fachadas e na Cobertura	25,04 m <sup>2</sup>

Figura 7.22 : Tabela com as áreas de tecnologia fotovoltaica (eficiência de 22,2%) necessárias, na fachada lateral esquerda, para a geração da energia estimada para o consumo nas moradias de tipologias T2 e T5.

fotovoltaica. Embora aqui as áreas necessárias diminuam de modo mais significativo, relativamente à Forma Inicial, do que a diminuição verificada nas áreas necessárias na cobertura. Como tal, as operações de transformação na fachada revelam-se mais eficientes do que as operações de transformação na cobertura, no que diz respeito à diminuição da área necessária para a aplicação de tecnologia fotovoltaica, relativamente à Forma Inicial. Embora em valores absolutos, as áreas necessárias na cobertura sejam inferiores às áreas necessárias na fachada, pelo que é mais vantajoso economicamente aplicar tecnologia fotovoltaica na cobertura, relativamente à sua aplicação na fachada.

Importa também salientar que face à tendência crescente de utilização e consumo de energia elétrica, seja nos veículos de transporte elétricos, na robótica de assistência doméstica, nos eletrodomésticos, nos próprios elementos arquitetónicos (como paredes, pavimentos e coberturas amovíveis), entre outros, assume bastante relevo a capacidade de os envelopes gerarem mais energia elétrica do que aquela que é atualmente estimada para o consumo nos utensílios e dispositivos de que dispomos hoje em dia nas habitações. Como tal, os valores de energia elétrica indicados nas Figuras 7.19 e 7.20, que excedem os valores estimados de consumo, tornam-se bastante úteis de acordo com essa perspetiva. Tal energia pode ser aplicada nos veículos elétricos, robótica doméstica, eletrodomésticos, elementos arquitetónicos, entre outros, ou mesmo vendida à rede de abastecimento elétrico, abastecendo desse modo outros locais para além das moradias onde é gerada.

Interessa de igual modo referir que os materiais que são utilizados para a construção do envelope de um edifício também intervêm no desempenho energético de um edifício e podem intervir na definição da forma do seu envelope. Quanto maior for a capacidade de inércia térmica dos materiais utilizados na construção do envelope, menores serão os valores de consumo energético do edifício, o que pode influenciar a necessidade de produção de energia elétrica e a forma do envelope do edifício.

Contudo, a presente tese encontra-se focada no aspeto da geração de energia através do envelope do edifício, relacionando apenas o factor forma do envelope

do edifício com o factor desempenho energético do edifício, no que diz respeito à capacidade de exposição do envelope aos raios solares e à sua consequente capacidade de geração de energia elétrica. Conforme acima indicado, é definido para as moradias em estudo um valor estimado de consumo energético, valor esse que é fixo e é obtido através do valor de consumo médio *per capita* em habitações. A opção por um valor fixo de consumo energético deve-se ao facto de que o valor em que este se baseia, o valor de consumo médio *per capita*, ser um valor estimado para o território português, pela Base de Dados Portugal Contemporâneo PORDATA (PORDATA, 2019). Tal valor tem em consideração os diferentes tipos de clima e os diferentes tipos de materiais de construção utilizados nos edifícios de habitação em Portugal. Assim sendo, o valor fixo de consumo energético constitui-se como um valor médio de consumo para as habitações em todo o território português, o qual serve como uma referência para esta fase inicial de investigação sobre o projeto digital de envelopes de edifícios. Trata-se de um valor que é mais útil nesta fase de investigação, em que é abordada somente a fase de conceção da forma do envelope dos edifícios, sem serem considerados ainda os materiais de construção a aplicar no envelope dos edifícios.

Optou-se nesta fase de investigação por abordar apenas a relação entre forma e capacidade de geração de energia do edifício, privilegiando-se ao nível da conceção do edifício o factor forma relativamente ao factor material, de modo a melhor perceber o impacto que a forma isoladamente tem na capacidade de geração de energia de um edifício. De acordo com a experiência do autor da tese, focar primeiro os aspetos de forma e depois os aspetos materiais, é um procedimento habitual no projeto de arquitetura. Mesmo que os materiais utilizados na construção de um edifício reduzam ou anulem as necessidades de aquecimento, arrefecimento, iluminação e ventilação de um edifício, existem necessidades de consumo energético, relativas à iluminação artificial (a qual é necessária no período noturno) e aos equipamentos eletrónicos, que não são possíveis de serem reduzidas ou anuladas pelos materiais de construção utilizados. É necessária a geração e a utilização de energia para essas necessidades de consumo energético, energia essa que pode ser obtida de um

modo eficiente através da forma do envelope do edifício, no que diz respeito à sua capacidade de exposição aos raios solares.

Como tal, pretende-se considerar o factor material numa fase mais avançada de projeto, posterior à definição da forma geral do edifício. Possibilitando-se que a fase de definição dos materiais de construção permita alterações à forma do envelope do edifício, se necessário, de modo a que a energia gerada no envelope seja superior à energia consumida no edifício. Pretende-se abordar essa temática numa futura fase de investigação. No entanto, apesar de se reservar para uma etapa mais avançada de projeto a definição dos materiais de construção, assume-se como certo que estes influenciam o consumo energético de um edifício, que a sua definição influencia a quantidade de energia que o edifício necessita de gerar e, conseqüentemente, que podem influenciar a forma do envelope do edifício. Por isso, em futura fase de investigação, durante a fase de definição dos materiais de construção, deverá ser estimado o consumo energético do edifício para um leque diversificado de materiais de construção e analisadas as diferenças do valor de consumo face ao valor de consumo energético definido na presente tese, a partir do valor de consumo médio *per capita*. Feita essa análise, deverá ser ponderado se é válido o método utilizado na presente tese, o de basear a geração da forma do envelope do edifício utilizando um valor de consumo energético definido a partir do valor de consumo médio *per capita*, definindo-se os materiais de construção numa fase mais avançada de projeto e ajustando-se depois a forma do envelope, se necessário. Ou se é mais vantajoso definir os materiais de construção a utilizar, e o consumo energético que estes provocam no edifício em projeto, logo na fase inicial de projeto da forma do envelope do edifício.

Importa ainda referir que existem impactos relativos aos vários tipos de consumo energético existentes nos edifícios (como por exemplo AVAC, iluminação, eletrodomésticos, entre outros). A análise dos valores dos impactos relativos aos vários tipos de consumo energético faz também sentido numa fase mais avançada de investigação sobre o projeto digital de envelopes de edifícios, em que se definem os materiais de construção e a influência que estes têm no consumo energético do edifício. Como exemplo, pode-se referir que um edifício

pode ou não necessitar de AVAC, o qual serve para responder às necessidades de aquecimento, arrefecimento e ventilação no interior de um edifício, consoante o tipo de materiais de construção que são utilizados no envelope do edifício. Assim sendo, pretende-se desenvolver a temática dos impactos relativos dos vários tipos de consumo energético (AVAC, iluminação, eletrodomésticos, entre outros), também numa fase mais avançada sobre o projeto digital de envelopes de edifícios, em conjunto com a temática dos materiais de construção.

Sintetizando, na presente tese optou-se por considerar apenas a temática da forma do envelope dos edifícios, no que se refere à sua capacidade de captar a irradiação solar incidente e de gerar energia elétrica, por recurso à utilização de tecnologia fotovoltaica. Numa fase mais avançada de investigação sobre o Projeto Digital de Envelopes de Edifícios, considerar-se-á a integração dos materiais de construção no envelope dos edifícios, a sua influência no consumo energético dos edifícios e na forma do envelope dos edifícios, bem como os impactos relativos dos vários tipos de consumo energético (AVAC, iluminação, eletrodomésticos, entre outros), sendo possível detalhar com maior rigor a forma do envelope dos edifícios e os valores finais de consumo e de geração de energia elétrica nos edifícios.

## **7.4 Discussão dos resultados**

Da análise da relação entre forma e desempenho energético do envelope, apresentada no subcapítulo anterior, interessa elaborar uma discussão acerca dos resultados alcançados. Assim sendo, efetuando uma síntese desses resultados, importa destacar que:

→ Nas formas estáticas das tipologias T2 e T5, as operações de transformação de forma realizadas aumentam, relativamente à forma inicial, o valor da irradiação incidente por  $m^2$ , mas diminuem, na generalidade, o valor da irradiação incidente total no envelope. O aumento da irradiação incidente por  $m^2$  deve-se à melhoria da eficiência das superfícies, no que diz respeito à captação da irradiação solar incidente. A diminuição da irradiação incidente total deve-se ao facto de as áreas

das superfícies do envelope diminuírem, relativamente à forma inicial, com a aplicação das operações de transformação de forma;

→ Nas formas dinâmicas das tipologias T2 e T5, o valor da irradiação incidente por  $m^2$  mantém-se idêntico na tipologia T2 e aumenta na tipologia T5, enquanto que o valor da irradiação incidente total aumenta em ambas as tipologias. Isto relativamente às formas estáticas que servem de base para a elaboração das formas dinâmicas. Como tal, as formas dinâmicas revelam-se eficientes para uma melhoria do desempenho do envelope no que se refere à captação da irradiação solar incidente;

→ No que diz respeito às superfícies das coberturas das tipologias T2 e T5, o valor da irradiação incidente por  $m^2$  e o valor da irradiação incidente total também aumentam, relativamente à forma inicial, com as operações de transformação de forma, nas formas estáticas e nas formas dinâmicas. No entanto, o desempenho das superfícies da cobertura das formas estáticas que contêm também uma operação de transformação de forma à fachada lateral esquerda do envelope constitui uma exceção. Pelo facto de apresentarem uma transformação de forma à fachada, o valor da irradiação incidente total nas superfícies da cobertura dessas formas estáticas diminui, pois a área total da cobertura diminui. Isto apesar do valor da irradiação incidente por  $m^2$  na cobertura dessas formas estáticas se manter idêntico ou aumentar;

→ As operações de transformação de forma à fachada lateral esquerda dos envelopes das tipologias T2 e T5 também se revelaram eficientes para melhorar o valor da irradiação incidente por  $m^2$  e o valor da irradiação incidente total na fachada lateral esquerda do envelope da forma inicial, melhorando o seu desempenho;

→ Em geral, para as tipologias T2 e T5, o valor do “Ganho energético relativo à Forma Inicial” aumenta, nas superfícies da cobertura dos envelopes, com o aumento das operações de transformação de forma às superfícies da cobertura do envelope. A operação de transformação que torna a forma dos envelopes dinâmica também faz com que o valor do

ganho energético na cobertura aumente, relativamente à forma estática do envelope que serve de base para a elaboração da forma dinâmica;

→ Também no que diz respeito às formas do envelope das tipologias T2 e T5 que apresentam transformações de forma na fachada lateral esquerda do envelope, se verifica um aumento do “Ganho energético relativo à Forma Inicial”, mais precisamente um aumento do ganho energético relativo à superfície da fachada lateral esquerda da forma inicial do envelope. Importa salientar que o ganho energético percentual na maior parte destes casos é consideravelmente mais elevado quando comparado com o ganho energético percentual que se verifica nas transformações de forma efetuadas às superfícies da cobertura do envelope;

→ Em concordância com o que se verifica nos ganhos energéticos relativos à forma inicial, nas transformações de forma efetuadas quer às superfícies da cobertura, quer às superfícies da fachada lateral esquerda do envelope das tipologias T2 e T5, é possível verificar que a área fotovoltaica necessária no envelope dos edifícios, para que se possa produzir a energia estimada para o consumo no edifício, diminui na maior parte dos casos, com o aumento das operações de transformação de forma às superfícies da cobertura e da fachada lateral esquerda do envelope. No conjunto das formas de ambas as tipologias, incluindo as formas com transformações focadas nas superfícies da cobertura e as formas com transformações focadas nas superfícies da fachada lateral esquerda do envelope, a “Forma Rodada, Dividida e Normalizada” e a “Forma Dinâmica” são aquelas que apresentam melhores resultados, obtendo valores mais reduzidos de área fotovoltaica necessária para a produção da energia estimada para o consumo no edifício.

Deste modo, é previsível que o aumento do número de operações de transformação à forma do envelope das tipologias T2 e T5, nomeadamente as operações de divisão e de normalização, nas superfícies da cobertura e das fachadas do envelope, faça com que o valor da irradiação incidente por  $m^2$  nessas superfícies aumente, melhorando desse modo o desempenho energético

das superfícies do envelope no que se refere ao “Valor de energia elétrica gerada”, ao “Ganho energético relativo à Forma Inicial” e à “Área fotovoltaica necessária” para a produção da energia estimada para o consumo no edifício. Pretende-se verificar a viabilidade dessa previsão, elaborando formas para o envelope das tipologias T2 e T5 com mais operações de transformação de forma, numa fase futura de investigação.

## 7.5 Síntese do Capítulo

O presente capítulo descreve um caso de estudo relativo ao Projeto Digital de Envelopes de Edifícios, o qual consiste no projeto digital do envelope de duas tipologias de moradias unifamiliares, apoiado pelo protótipo LIDIA. É definida a localização das tipologias de moradia em um lote urbano vago na freguesia de Belém, cidade de Lisboa, em Portugal, e é estabelecido o contexto do projeto para o envelope das moradias. O LIDIA é utilizado durante o processo de projeto para gerar soluções formais com um adequado desempenho energético para o envelope, através da aplicação das transformações de forma da Gramática do Envelope de Edifícios. São analisados os resultados obtidos para a irradiação solar incidente no envelope, para a geração de energia elétrica no envelope, e para a área fotovoltaica necessária no envelope para a produção da energia estimada para o consumo no edifício. Através do caso de estudo elaborado, mostra-se que a metodologia de projeto proposta, apoiada pelo protótipo de software desenvolvido, é válida para projetar envelopes de edifícios que produzem a energia que os edifícios necessitam de consumir durante o seu ciclo de vida.

Neste capítulo podem ser destacados os seguintes contributos para o conhecimento e para a prática da Arquitetura:

- A experimentação e validação de um método de projeto, o Projeto Digital de Envelopes de Edifícios, o qual permite projetar formas para o envelope dos edifícios que sejam energeticamente eficientes, ou seja, formas que obtenham um desempenho eficiente no que se refere à captação dos raios solares, sendo capazes de produzir no mínimo a energia elétrica que o edifício consome. Nos casos em que é possível produzir consideravelmente mais energia do que o

edifício necessita de consumir, importa que a forma seja eficiente em fazê-lo com o mínimo de área necessária para a produção dessa mesma energia. Desse modo, obtém-se também um desempenho eficiente no que se refere à relação entre a área do envelope e a quantidade de energia elétrica que este produz.

## 7.6 Referências do Capítulo 7

**Pearce, Peter. 1990.** *Structure in Nature is a Strategy for Design*. Cambridge, Massachusetts: The M.I.T. Press.

**PORDATA. 2019.** *Consumo de energia eléctrica per capita: total e por tipo de consumo*.

Acedido em 12 de Junho, 2019.

<https://www.pordata.pt/DB/Portugal/Ambiente+de+Consulta/Tabela>

[Recurso Online]

**Portas, Nuno. 1969.** *Funções e Exigências de Áreas da Habitação*. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil.

**Reis, Pedro. 2018.** *Quais são os painéis solares fotovoltaicos mais eficientes no mercado?*

Acedido em 12 de Junho, 2019.

<https://www.portal-energia.com/paineis-solares-fotovoltaicos-mais-eficientes-mercado/>

[Recurso Online]

**OASRS. 2020.** *Regulamento Geral das Edificações Urbanas*.

Acedido em 8 de Junho, 2020.

<https://www.oasrs.org/documents/11013/16445/RGEU.pdf/3e0c6aed-15e9-43c5-b70e-6e4e0ff4e3dc>

[Recurso Online]



# **CAPÍTULO 8**

## **Conclusões**



# CAPÍTULO 8

## Conclusões

Este capítulo final sintetiza e estabelece conclusões sobre a investigação realizada na presente tese. Faz uma reflexão final sobre o tema investigado e sobre os resultados alcançados. Refere também as descobertas e os contributos da investigação, e indica quais os desenvolvimentos futuros previstos.

### 8.1 Reflexão Final

A presente tese tem como argumento a energia poder constituir, tal como a forma, um elemento essencial no projeto e na conceção de objetos tal como os edifícios, por exemplo. O destaque que é dado à relação entre energia e forma resulta da análise que é feita dos processos de geração de forma, na área da biologia, a qual estabelece uma ligação próxima entre a forma dos seres vivos e os processos energéticos que ocorrem quer no interior dos seus corpos, quer no seu meio exterior envolvente. Estabelecendo um paralelismo com o que sucede na Natureza, a presente tese pretende demonstrar a hipótese de que a forma de um objeto projetado pelo ser humano pode ser influenciada pelos processos energéticos que ocorrem no exterior desse objeto, influenciando estes por sua vez as características internas do objeto projetado. Quando isso sucede, o desempenho energético de tal objeto torna-se mais eficiente. Como tal, a presente investigação desenvolve um sistema de projeto que pretende replicar os processos de formação existentes na Natureza, tendo em consideração que estes são condicionados e influenciados por processos energéticos.

Após evidenciar a influência que a energia tem na formação dos seres vivos, a investigação enquadra a importância que a energia teve e tem também no funcionamento da sociedade, inclusive nos próprios edifícios, ao longo da história. Procura definir algumas das áreas de atividade humana e áreas tecnológicas onde a energia é preponderante, destacando igualmente a importância que esta tem no ciclo de vida dos edifícios e no processo de conceção em arquitetura. Tendo em conta esses fatores, estabelece uma

proposta para uma visão e linha de investigação: o Projeto baseado em Energia. Após este enquadramento, é abordado um caso de estudo específico, o Projeto Digital de Envelopes de Edifícios, o qual pretende validar o paradigma do Projeto baseado em Energia. São estabelecidos para o Projeto Digital de Envelopes de Edifícios um âmbito, um sistema, uma metodologia, dois instrumentos conceptuais e um instrumento prático de projeto para a conceção de envelopes de edifícios energeticamente eficientes, de modo a que estes sejam capazes de gerar no mínimo a energia que os edifícios necessitam de consumir, através da captação da energia solar e da sua transformação em energia elétrica por meio da utilização de tecnologia fotovoltaica.

Para a definição do Projeto Digital de Envelopes de Edifícios, começa por ser elaborado um sistema Arquitetura-Envelopes de Edifícios (Sistema AE), o qual enquadra e relaciona o projeto digital de envelopes de edifícios com outros tipos de projeto a montante, como o projeto geral de arquitetura, e a jusante, como o projeto das zonas não opacas (vãos) de um edifício. Segue-se o desenvolvimento de uma metodologia para o projeto digital de envelopes de edifícios, onde são elaborados dois instrumentos conceptuais para a conceção de envelopes de edifícios, sendo estes o conceito teórico de Algoritmo de Forma e uma Gramática do Envelope de Edifícios, os quais são baseados nos conceitos de gramática da forma, gramática descritiva, gramática discursiva e gramática genérica. Para a constituição de um instrumento prático de projeto, a gramática do envelope de edifícios é implementada em um protótipo de software, designado por LIDIA.

O LIDIA é testado no desenvolvimento de um projeto para o envelope de duas tipologias de moradias unifamiliares, onde é possível comprovar que a gramática do envelope de edifícios é eficiente para a geração de formas para o envelope que apresentem um adequado desempenho energético, sendo essas formas capazes de gerar no mínimo a energia estimada que o edifício necessita de consumir durante o seu período de vida. A eficiência da gramática do envelope de edifícios é alcançada através de dois fatores:

- 1) a aplicação das regras da gramática permitem transformar as formas dos envelopes dos edifícios, de modo a melhorar o seu desempenho

energético no que se refere à captação da irradiação solar incidente no envelope;

- 2) é possível estabelecer, através da gramática descritiva incluída na gramática do envelope de edifícios, descrições de objetivos, nomeadamente o valor pretendido para a irradiação solar incidente no envelope do edifício.

Ao se estabelecer o valor para o objetivo pretendido na gramática descritiva, o projetista pode explorar as regras das gramáticas de forma no sentido de gerar soluções formais com melhor desempenho para o envelope dos edifícios, ou seja, soluções formais que cumpram com o valor estabelecido para o objetivo pretendido. Isso é conseguido através da aplicação das regras de transformação de forma das gramáticas de forma, as quais são continuamente aplicadas à forma do envelope dos edifícios, até que as formas em questão alcancem o objetivo definido, isto é, o valor estabelecido para a irradiação solar incidente no envelope.

Deste modo, através dos dois fatores indicados, isto é, 1) a aplicação das regras de transformação de forma das gramáticas de forma, e 2) a descrição do valor pretendido, na gramática descritiva, para a irradiação solar incidente no envelope dos edifícios, é possível gerar formas para o envelope dos edifícios com o desempenho energético pretendido. Através destes dois fatores, é criado um processo de geração de forma para o envelope dos edifícios. Processo esse que pode ser executado de um modo manual e iterativo pelo projetista, aplicando este as regras de transformação das gramáticas de forma até se alcançar no mínimo o valor definido como objetivo para a irradiação solar incidente no envelope.

Assim, o projetista dispõe de um processo para gerar formas que podem ser consideradas como válidas para o envelope dos edifícios, evitando em simultâneo que sejam geradas formas não válidas para o envelope dos edifícios, ou seja, formas que não tenham o desempenho energético estabelecido como objetivo no que se refere à irradiação solar incidente no envelope dos edifícios.

Interessa também referir que para o projeto do envelope das tipologias de moradias elaborado na presente tese foram projetadas formas estáticas e formas dinâmicas para o envelope das moradias, verificando-se que as formas dinâmicas obtêm em muitos dos casos um melhor desempenho do que as formas estáticas.

Através da utilização do LIDIA no projeto do envelope das duas tipologias de moradias, torna-se possível controlar a forma e o desempenho energético, no que se refere à irradiação solar incidente no envelope, das moradias projetadas, através do sistema de projeto proposto. Fica deste modo validada a hipótese de investigação da presente tese, nomeadamente:

***É possível tornar os edifícios produtores de energia, orientando o projeto de arquitetura para uma procura de forma baseada na captação de energia solar, através de um sistema de projeto de envelopes de edifícios que permite conceber formas que maximizam a captação de energia solar no envelope, para diferentes contextos geográficos.***

São também desse modo fornecidas respostas às duas questões de investigação colocadas, nomeadamente:

#### **PRIMEIRA RESPOSTA DA INVESTIGAÇÃO:**

***Para projetar edifícios produtores de energia, é proposto um sistema de projeto para o envelope dos edifícios, o qual orienta o projeto de arquitetura para uma procura de forma baseada na captação de energia solar.***

#### **SEGUNDA RESPOSTA DA INVESTIGAÇÃO:**

***É criado um processo específico para projetar o envelope dos edifícios, tornando-os eficientes no que se refere à captação de energia solar, de modo a que os envelopes tenham a capacidade de produzir no mínimo a***

***energia elétrica que os edifícios consomem, sendo esse processo específico o sistema de projeto proposto.***

Importa ainda salientar que a Gramática do Envelope de Edifícios e o protótipo LIDIA, elaborados para o sistema de projeto proposto, o Sistema AE (Arquitetura-Envelopes de Edifícios), pretendem constituir-se como ferramentas de projeto de edifícios, e não apenas como ferramentas de apreciação do potencial de ganhos energéticos do envelope de edifícios, pois tratam-se de ferramentas que permitem criar e transformar formas para o envelope de edifícios. As formas do envelope dos edifícios são criadas e transformadas através da definição da forma inicial e da aplicação das regras de transformação da gramática do envelope de edifícios. A avaliação da irradiação solar incidente no envelope dos edifícios permite perceber o desempenho das diferentes formas criadas e transformadas, para o envelope dos edifícios. As regras elaboradas constituem um exemplo das regras de criação e de transformação que constituem a gramática do envelope de edifícios, pretendendo-se que mais regras venham posteriormente a integrar a gramática, de modo a enriquecer a capacidade desta na criação e transformação de formas para o envelope de edifícios. Indicam-se exemplos de regras que se pretendem vir a desenvolver no subcapítulo 8.3 (Desenvolvimentos Futuros), mais adiante.

Pelos motivos acima indicados, entende-se que as ferramentas apresentadas na presente investigação, apesar de não estarem desenvolvidas na sua plenitude, constituem-se como ferramentas de projeto de edifícios, permitindo ao projetista criar, transformar e avaliar formas para o envelope de edifícios. Como tal, pretendem formar uma prova de conceito que valide um modelo de projeto para o Projeto Digital de Envelopes de Edifícios e para o Projeto baseado em Energia. Interessa também referir que o protótipo LIDIA ainda não foi testado por diferentes projetistas, de modo a recolher a sua impressão acerca da utilização do LIDIA e acerca da sua utilidade enquanto ferramenta de projeto de edifícios. Pretende-se possibilitar esse teste, por parte de diferentes utilizadores, numa fase futura da presente investigação.

## 8.2 Contribuições

A presente tese apresenta descobertas, bem como contribuições de menor e de maior relevo, para as áreas da arquitetura, do projeto, das gramáticas da forma e do desempenho energético dos edifícios. Apresentam-se de seguida essas descobertas, bem como as contribuições de menor relevo e as contribuições de maior relevo.

### 8.2.1 Descobertas

As descobertas alcançadas são as seguintes:

- As operações, da gramática do envelope de edifícios, de rotação do volume do envelope do edifício e de normalização das superfícies do envelope do edifício são eficientes para melhorar o desempenho energético de um edifício, nomeadamente para aumentar a irradiação solar incidente no envelope e, conseqüentemente, a capacidade de geração de energia elétrica pelo mesmo. A operação de normalização provoca maiores ganhos, sendo mais eficiente do que a operação de rotação;
- Diferentes sequências das operações de rotação, normalização e divisão geram diferentes formas e desempenhos energéticos para o envelope de edifícios. Como tal, é válida a exploração criativa de diferentes sequências de operações para a elaboração da forma do envelope dos edifícios, tendo como critérios o desempenho energético e as intenções estéticas dos utilizadores da gramática. Os utilizadores podem assim livremente e de um modo criativo elaborar algoritmos para o envelope dos edifícios que projetam;
- As formas que são dinâmicas apresentam, em alguns casos, resultados mais elevados no desempenho energético do que as formas estáticas, sendo por isso em alguns casos mais eficientes do que as formas estáticas.

## 8.2.2 Contribuições de menor relevo

Quanto às contribuições de menor relevo, são elas:

- A definição de um modelo do tipo BEM (Building Energy Modeling) que serve de base para a elaboração de instrumentos práticos (softwares) que suportem o projeto de arquitetura baseado em desempenho energético. O modelo tipo BEM elaborado pretende constituir um complemento ao modelo tipo BIM (Building Information Modeling), destacando a energia como informação essencial para o processo de concepção em arquitetura e para a formação das soluções formais e construtivas dos edifícios. O modelo tipo BEM definido serve pois de base para a elaboração de software que suporte o projeto de arquitetura de edifícios com um eficiente desempenho energético;
- O aperfeiçoamento de um modelo de gramática, a gramática genérica discursiva. O aperfeiçoamento em causa consiste em conferir a este tipo de gramática a capacidade de gerar e transformar um leque diversificado de formas para o envelope de edifícios, de acordo com um eficiente desempenho energético. Isso é conseguido através da estrutura de gramáticas paralelas e através das operações e regras de transformação de forma que são estabelecidas na Gramática do Envelope de Edifícios, as quais podem ser aplicadas a um leque diversificado de formas iniciais que sejam definidas para o envelope de edifícios, de modo a que se possam gerar formas para o envelope de edifícios com um desempenho energético eficiente;
- A definição de um método de criação e de utilização de instrumentos práticos de projeto, nomeadamente instrumentos digitais como é o caso dos softwares. A implementação de uma gramática genérica discursiva, utilizando uma gramática descritiva e diferentes gramáticas de forma complementares entre si, por meio de programação textual, em um ambiente de programação visual, permite a elaboração pelos projetistas de diferentes algoritmos para o envelope de edifícios, podendo depois as soluções formais geradas por tais algoritmos serem exploradas de um modo interativo, apelativo e intuitivo em um interface gráfico simplificado

de utilizador pelos utilizadores finais do software. Este método inclui os seguintes passos:

→ “Implementação de gramática genérica discursiva por programação textual em um ambiente de programação visual” →

→ “Elaboração pelos projetistas de algoritmos por programação visual” →

→ “Exploração pelos utilizadores finais das soluções formais permitidas pelos algoritmos em um interface gráfico simplificado de utilizador final”,

e consiste em um método que pode ser utilizado para a elaboração e utilização de outros instrumentos práticos digitais que suportem o exercício da atividade de projeto de Arquitetura.

### **8.2.3 Contribuições de maior relevo**

No que diz respeito às contribuições de maior relevo, são elas as seguintes:

- A definição de uma visão e de uma linha de investigação para a disciplina da Arquitetura, o Projeto baseado em Energia, o qual incorpora a energia como elemento de conceção criativa na disciplina da Arquitetura. O Projeto baseado em Energia pode também ser aplicado às disciplinas do Urbanismo, do Design e da Ergonomia, pois o seu princípio fundamental, o de que a energia pode ser um elemento conceptual e criativo, é válido para diferentes disciplinas, sejam elas de âmbito mais artístico ou mais científico;

- A constituição de um enquadramento teórico sobre a energia, que inclui os seguintes aspetos:

→ a importância que a energia teve e tem para o ser humano e para a sociedade ao longo da história;

→ algumas das áreas de atividade humana e das áreas tecnológicas onde se prevê que a energia possa assumir um papel

fundamental para o desenvolvimento de produtos e de serviços, bem como para o aumento da qualidade de vida do ser humano;

→ os aspetos em que a energia mais influência tem na área dos edifícios e a vantagem de incorporar a energia no processo de conceção em arquitetura.

- A sugestão de um campo de atuação e de um âmbito para o Projeto Digital de Envelopes de Edifícios, justificável na medida em que:

1 – Os edifícios são responsáveis por 36% do consumo energético em todo o mundo (United Nations Environment and International Energy Agency 2017, 14), sendo o envelope a zona com maior impacto no consumo energético dos edifícios;

2 – A nível mundial, a aposta nas energias renováveis endógenas, como a energia solar, é crescente, conforme se pode verificar pela análise de dados estatísticos publicados na internet (Ritchie e Roser, 2019). Como tal, faz sentido projetar, construir e reabilitar o envelope dos edifícios de modo a torná-los mais eficientes não apenas no que se refere ao consumo energético, mas também no que diz respeito à geração de energia elétrica, por meio de fontes de energia renovável;

3 – Por serem fundamentais para o projeto de envelopes de edifícios eficientes a utilização da trajetória solar, o cálculo da energia solar incidente, o cálculo do consumo de energia no edifício e a geração e transformação da geometria do envelope, é útil o recurso a meios digitais para este tipo de projeto. Daí a sua designação por Projeto Digital de Envelopes de Edifícios.

- A definição de um Sistema Arquitetura-Envelopes de Edifícios (Sistema AE) que enquadre o Projeto Digital de Envelopes de Edifícios no âmbito mais vasto do projeto de Arquitetura, organizando e permitindo um simplificado fluxo de informação e de dados digitais entre os dois;

- A constituição de uma Metodologia para o Projeto Digital de Envelopes de Edifícios, estabelecendo de um modo flexível os passos e as fases a seguir de modo a elaborar este tipo de projeto. Para concretizar a metodologia proposta para o projeto digital de envelopes de edifícios no sistema Arquitetura-Envelopes de Edifícios sugerido, são criados os seguintes instrumentos conceptuais:

- o conceito de Algoritmo de Forma e

- uma Gramática do Envelope de Edifícios, baseada nos conceitos de gramática da forma, gramática descritiva, gramática discursiva e gramática genérica.

O conceito teórico de algoritmo de forma ambiciona projetar qualquer forma para o envelope de um edifício, de modo a torná-lo eficiente no seu desempenho energético, tendo em consideração o contexto ambiental, o contexto legal, o programa e o espaço interior do edifício. A gramática do envelope de edifícios constitui um caso específico de um algoritmo de forma, formando uma gramática genérica discursiva, a qual permite a geração de diferentes gramáticas específicas e de diferentes formas específicas para o envelope de edifícios, todas elas provenientes de uma mesma forma inicial;

- A definição da Gramática do Envelope de Edifícios, a qual permite a criação de envelopes de edifícios com um eficiente desempenho energético, os quais geram para isso no mínimo a energia elétrica que o edifício consome durante a sua fase de utilização, ao longo do seu ciclo de vida. A geração de energia é feita por meio da captação dos raios solares nos envelopes dos edifícios, convertendo-se a energia solar incidente nos envelopes em energia elétrica por meio da utilização de tecnologia fotovoltaica;

- O início da criação de um instrumento prático de projeto, o protótipo de software LIDIA, o qual permite utilizar de um modo interativo, apelativo e intuitivo a Gramática do Envelope de Edifícios, bem como estabelecer um

tipo de projeto, o Projeto Digital de Envelopes de Edifícios, que contribui para a teoria e para a prática da disciplina da Arquitetura;

- A experimentação e validação de um método de projeto, o Projeto Digital de Envelopes de Edifícios, o qual permite projetar formas que sejam energeticamente eficientes para o envelope de edifícios, ou seja, formas que obtenham um bom desempenho no que se refere à captação dos raios solares, sendo capazes de gerar no mínimo a energia que o edifício consome. Mesmo nos casos em que as formas projetadas têm capacidade de gerar consideravelmente mais energia do que o edifício necessita, estas são úteis na medida em que são eficientes em fazê-lo com o mínimo de área e material fotovoltaico necessário. As formas que têm mais capacidade de geração de energia são aquelas que, em geral, são mais eficientes nesse sentido, ou seja, na geração de energia por metro quadrado de superfície. Desse modo, utilizando tais formas, consegue-se um desempenho eficiente no que se refere à relação entre a área do envelope e a quantidade de energia que este é capaz de gerar. Tornando-se por isso possível, com uma menor área do envelope, gerar a energia que o edifício necessita de consumir.

### **8.3 Desenvolvimentos Futuros**

São também previstos os seguintes desenvolvimentos futuros, de modo a prosseguir com a investigação desenvolvida na presente tese:

- Definir formalmente o conceito teórico de algoritmo de forma do envelope de edifícios (ou “gramática universal” do envelope de edifícios), ampliando as capacidades da Gramática do Envelope de Edifícios, a qual contém uma forma inicial genérica para o envelope dos edifícios. Pretende-se que o algoritmo de forma do envelope de edifícios não contenha nenhuma forma inicial pré-definida, podendo incluir qualquer forma inicial que seja definida pelo seu utilizador. As regras de transformação do algoritmo de forma são semelhantes às regras de transformação que compõem a gramática genérica discursiva do envelope de edifícios. É contudo

necessário elaborar as gramáticas da forma e a gramática descritiva que definem o conceito teórico de algoritmo de forma;

- Elaborar mais regras de transformação de forma e desenvolver a gramática do envelope de edifícios. Esse desenvolvimento é orientado com o objetivo de que o LIDIA se constitua como um software de acordo com o modelo tipo BEM (Building Energy Modeling), o qual deverá servir de suporte para o projeto de envelopes de edifícios, de acordo com o descrito na presente tese. Têm prioridade o desenvolvimento das regras que se referem às seguintes fases da metodologia do projeto digital de envelopes de edifícios e da gramática do envelope de edifícios:

→ Fase D – Definição da forma final do envelope do edifício: pretendem-se desenvolver regras que permitam mover o envelope do edifício, alterar a escala do envelope do edifício, acrescentar volumes ao envelope do edifício e subtrair volumes ao envelope do edifício, por exemplo;

→ Fase E – Definição das zonas opacas (exemplo: paredes), zonas não opacas (exemplo: vãos) e outras zonas (exemplo: palas de sombreamento): aqui pretendem-se desenvolver regras que permitam definir os vãos e as palas de sombreamento no envelope de um edifício, por exemplo;

→ Fase F – Definição das zonas de geração de energia: pretendem-se desenvolver regras que permitam definir as zonas do envelope que se destinam a conter elementos fotovoltaicos, para a conversão dos raios solares em energia elétrica;

→ Fase G – Definição da estrutura e dos materiais de construção: neste caso, pretende-se elaborar regras que permitam definir a estrutura e os materiais de construção que constituem o envelope de um edifício.

- Desenvolver as Fases 7 a 10 do modelo tipo BEM proposto na presente tese, as quais definem os elementos construtivos (estrutura e materiais de construção) do envelope do edifício em projeto, e elaboram a informação

técnica relativa à definição das características do envelope do edifício (plantas, cortes, alçados, perspetivas tridimensionais, pormenores construtivos), disponibilizando-a num formato de ficheiro comum (ficheiro IFC), o qual pode ser utilizado por todas as especialidades profissionais intervenientes no projeto e na construção de um edifício. Integrar as fases da metodologia proposta para o projeto digital de envelopes de edifícios, bem como a gramática do envelope de edifícios, com as fases 7 a 10 do modelo tipo BEM, de modo a que estas constituam uma referência para o desenvolvimento do protótipo LIDIA, ampliando as suas capacidades enquanto instrumento prático de projeto que permite o projeto de envelopes de edifícios com um desempenho energético eficiente, no que diz respeito à irradiação solar incidente no envelope, e à produção e ao consumo de energia elétrica no edifício. Aplicar também o LIDIA em um ambiente imersivo de realidade virtual, ou em um ambiente de realidade mista, dando sequência a um trabalho de investigação do autor da presente tese que se relaciona com a conceção de edifícios em um ambiente imersivo de realidade virtual (Mateus et al. 2014);

- Ampliar o número de tipologias pré-definidas para o espaço interior de um edifício, na gramática descritiva da gramática do envelope de edifícios. As tipologias pré-definidas deverão ser para moradias unifamiliares isoladas, mas também para outras tipologias de edifícios, tais como a habitação coletiva em altura. Deste modo, é possível constituir um conjunto de soluções pré-definidas que possam ser utilizadas como plantas tipo do espaço interior do edifício que está a ser projetado. Pretende-se também possibilitar que a gramática do envelope de edifícios e o LIDIA possam ser utilizados para o projeto do envelope de mais tipologias de edifícios, para além da tipologia de moradia unifamiliar isolada. Por exemplo, para a tipologia de edifícios de habitação coletiva em altura. A gramática do envelope de edifícios e os componentes de programação visual do LIDIA devem ser desenvolvidos para esse efeito;
- Desenvolver o protótipo LIDIA, nomeadamente o código de programação textual dos seus componentes de programação visual, de modo a que possam gerar soluções formais complexas para o envelope de edifícios.

Testar o desenvolvimento realizado através da elaboração de soluções formais com maior nível de complexidade para o envelope das tipologias de moradias desenvolvidas na presente tese. Ou seja, elaborar formas para o envelope das moradias que sejam obtidas através da aplicação em maior número das operações de normalização, rotação, divisão, ou outras, da gramática do envelope de edifícios. Desenvolver também o código de programação do componente de avaliação das formas dinâmicas para o envelope dos edifícios, de modo a que a avaliação possa ser feita para cada uma das diferentes formas que compõem a forma dinâmica, e para mais períodos de tempo ao longo do ano, de modo a que a estimativa da irradiação solar incidente anual sobre uma forma dinâmica seja mais precisa;

- Elaborar o modo de Modelação Manual previsto para o sistema de projeto misto do LIDIA, permitindo que possam ser modeladas manualmente formas para a forma inicial do envelope de edifícios, e permitindo também que as formas geradas pelo LIDIA possam ser adaptadas manualmente pelos projetistas do envelope;
- Desenvolver o interface gráfico simplificado de utilizador do LIDIA, de modo a que o interface se possa constituir como um elemento mais autónomo durante o processo de projeto digital do envelope de edifícios. Deverá ser possibilitada a edição dos dados e da geometria presentes no interface, influenciando-se desse modo a geração das soluções formais que são permitidas pelos algoritmos elaborados em Grasshopper, e que são visualizadas no Rhinoceros 3D;
- Integrar um método de cálculo do consumo energético estimado, mais aprofundado e rigoroso do que o atual, o qual tenha em conta os materiais de construção aplicados no envelope, na Gramática do Envelope de Edifícios e no protótipo LIDIA. Torna-se assim possível comparar com maior precisão o cálculo da geração de energia elétrica estimada com o cálculo do consumo energético estimado. Obtém-se também desse modo um cálculo do desempenho energético do edifício (geração versus consumo) mais aprofundado;

- Possibilitar a testagem do protótipo LIDIA por diferentes projetistas, de modo a recolher a impressão destes acerca da utilização e da utilidade do LIDIA enquanto ferramenta de projeto de edifícios;
- Explorar a utilização de algumas das áreas tecnológicas referidas no subcapítulo 3.2 (Áreas de atividade humana e áreas tecnológicas onde a energia é preponderante) no Projeto Digital de Envelopes de Edifícios. Nomeadamente, aplicar processos de inteligência artificial no LIDIA, permitindo que possam ser geradas automaticamente soluções formais para o envelope do edifício em projeto (e para as plantas do espaço interior do edifício, adaptando-se estas às soluções formais geradas para o envelope), as quais alcancem o desempenho energético pretendido para o envelope e para o edifício em projeto. Ou seja, o processo de inteligência artificial em causa deverá aplicar de um modo automático os componentes de programação visual do LIDIA (onde estão as regras de transformação da gramática do envelope de edifícios) para gerar formas para o envelope do edifício em projeto, até se alcançarem os valores, ou os intervalos de valores, definidos como objetivo para a irradiação solar incidente, para o valor da energia elétrica gerada e para o valor do consumo de energia elétrica no edifício;
- Colocar o interface gráfico de utilizador do LIDIA (após estar mais desenvolvido) em um website na World Wide Web (internet), permitindo que este possa ser utilizado por clientes para explorarem as soluções possíveis para o envelope do edifício que pretendem. O interface deverá fornecer informação sobre o desempenho energético do envelope e do edifício (no que se refere à energia elétrica que produz e à energia elétrica que consome), bem como sobre o espaço interior do edifício (as suas plantas, as suas áreas, e as dimensões dos seus espaços interiores). Oferece-se deste modo aos clientes a possibilidade de obterem soluções de projeto que sejam personalizadas, ou seja, de acordo com as suas preferências;
- Aplicar o Projeto baseado em Energia ao Projeto Digital de Espaços Interiores de Edifícios, de modo a se possibilitar o projeto de espaços

interiores de edifícios eficientes no que diz respeito ao consumo de energia elétrica. O Projeto Digital de Espaços Interiores de Edifícios deverá funcionar de um modo integrado com o Sistema Arquitetura-Envelopes de Edifícios (Sistema AE) definido na presente tese, e complementar o Projeto Digital de Envelopes de Edifícios, com o objetivo de aplicar o Projeto baseado em Energia ao Projeto de Arquitetura de Edifícios no seu todo.

Com estes desenvolvimentos pretende-se consolidar a visão do Projeto baseado em Energia, na expectativa de que possa contribuir para a melhoria do exercício da Arquitetura e para o aumento da qualidade de vida do ser humano.

## 8.4 Referências do Capítulo 8

**Mateus, D., Eduardo Castro e Costa, José Pinto Duarte e Joaquim Jorge.** 2014. "Tecton 3D - Simulacros Digitais: Modelando a Terceira Dimensão, Análise de Softwares de Modelação 3D". In *Arquiteturas do Mar, da Terra e do Ar - Arquitetura e Urbanismo na Geografia e na Cultura: 3º Seminário Internacional da AEAULP, 14-16 Outubro 2014*, editado pela AEAULP, Vol. III, 383-390. Faculdade de Arquitetura da Universidade de Lisboa, Portugal.

**United Nations Environment and International Energy Agency.** 2017. "Towards a zero-emission, efficient and resilient buildings and construction sector". Global Status Report 2017.

**Ritchie, Hannah e Max Roser.** 2019. *Renewable Energy*. Acedido a 25 de Julho de 2019. <https://ourworldindata.org/renewable-energy>

[Recurso Online]



# **ANEXOS**



## **Anexos do Capítulo 5**



## Anexo A5.1

Descrição Inicial da Gramática do Envelope de Edifícios				
d0:				
cl1.1 ← 0	cl1.2 ← 0	cl2.1 ← 0	cl2.2 ← 0	cl3.1 ← 0
cl3.2 ← 0	cl4.1 ← 0	cl4.2 ← 0	cl5.1 ← 0	cl5.2 ← 0
cl6.1 ← 0	cl6.2 ← 0	cl7.1 ← 0	cl7.2 ← 0	cl8 ← ∅
cl9.1 ← 0	cl9.2 ← ∅	cl10.1 ← 0	cl10.2 ← ∅	cl11 ← 0
ca1.1 ← 0	ca1.2 ← 0	ca2 ← 0	ca3 ← 0	ca4 ← 0
ca5 ← 0	ca6 ← ?	p1 ← ∅	p2 ← 0	p3.1 ← 0
p3.2 ← 0	p4 ← ?	eic1 ← 0	eic2 ← 0	eic3 ← 0
eic4 ← ∅	eic5 ← 0	eic6.1 ← 0	eic6.2 ← 0	eic6.3 ← 0
eic6.4 ← ∅	eip1 ← 0	eip2.1 ← ∅	eip2.2 ← 0	eip2.3 ← 0
eip2.4 ← 0	eip2.5 ← ∅	eip3.1 ← ∅	eip3.2 ← 0	eip3.3 ← 0
eip3.4 ← 0	eip3.5 ← ∅	eice1 ← 0		

Tabela A5.1 : Regra d0 da gramática descritiva, de Descrição Inicial da Gramática do Envelope de Edifícios

## Anexo A5.2

Especificação do Contexto Legal do Edifício
d1:
cl1.1 ← cl1.1 - <?numero>, ?numero ∈ [0,1] + <numero>, numero ∈ [0,1]
cl2.1 ← cl2.1 - <?numero>, ?numero ∈ [0,1] + <numero>, numero ∈ [0,1]
cl3.1 ← cl3.1 - <?numero>, ?numero ∈ [0,1] + <numero>, numero ∈ [0,1]
cl4.1 ← cl4.1 - <?numero>, ?numero ∈ [0,1] + <numero>, numero ∈ [0,1]
cl5.1 ← cl5.1 - <?numero>, ?numero ∈ [0,1] + <numero>, numero ∈ [0,1]
cl6.1 ← cl6.1 - <?numero>, ?numero ∈ [0,1] + <numero>, numero ∈ [0,1]
cl7.1 ← cl7.1 - <?numero >, ?numero ∈ [0,1]

<p>+ &lt;numero&gt;,                  numero ∈ [0,1]</p> <p>cl8 ← cl8 - &lt;?forma&gt;,                  ?forma C I<sub>1</sub> ∈ Lot Grammar L                  + &lt;forma&gt;,                  forma C I<sub>1</sub> ∈ Lot Grammar L</p> <p>cl9.1 ← cl9.1 - &lt;?numero &gt;,                  ?numero ∈ [0, r], r ∈ R                  + &lt;numero&gt;,                  numero ∈ [0, r], r ∈ R</p> <p>cl9.2 ← cl9.2 - &lt;?forma&gt;,                  ?forma C I<sub>1</sub> ∈ Lot Grammar L                  + &lt;forma&gt;,                  forma C I<sub>1</sub> ∈ Lot Grammar L</p> <p>cl10.1 ← cl10.1 - &lt;?numero &gt;,                  ?numero ∈ [0, r], r ∈ R                  + &lt;numero&gt;,                  numero ∈ [0, r], r ∈ R</p> <p>cl10.2 ← cl10.2 - &lt;?forma&gt;,                  ?forma C I<sub>1</sub> ∈ Lot Grammar L                  + &lt;forma&gt;,                  forma C I<sub>1</sub> ∈ Lot Grammar L</p> <p>cl11 ← cl11 - &lt;?numero &gt;,                  ?numero ∈ [0, r], r ∈ R                  + &lt;numero&gt;,                  numero ∈ [0, r], r ∈ R</p>
---

Tabela A5.2 : Regra d1 da gramática descritiva, de Especificação do Contexto Legal do Edifício

## Anexo A5.3

Especificação do Contexto Ambiental do Edifício	
d2:	<p>ca1.1 ← ca1.1 - &lt;?numero&gt;,                  ?numero ∈ [0, n], n ∈ N                  + &lt;numero&gt;,                  numero ∈ [0, n], n ∈ N</p>

Tabela A5.3 : Regra d2 da gramática descritiva, de Especificação do Contexto Ambiental do Edifício

## Anexo A5.4

Especificação do Programa do Edifício	
d3:	<p>p1 ← p1 - &lt;?tipo&gt;,                  ?tipo ∈ [T0, T1, T2, T3, T4, T5]</p>

```

+ <tipo>,
  tipo ∈ [T0, T1, T2, T3, T4, T5]

p2 ← p2 - <?numero>,
  ?numero ∈ [0, n], n ∈ N
+ <numero>,
  numero ∈ [0, n], n ∈ N

p3.1 ← p3.1 - <?numero>,
  ?numero ∈ [-n, n], n ∈ N
+ <numero>,
  numero ∈ [-n, n], n ∈ N

```

Tabela A5.4 : Regra d3 da gramática descritiva, de Especificação do Programa do Edifício

## Anexo A5.5

### Especificação do Espaço Interior do Edifício

```

d4:

eic1 ← eic1 - <?numero>,
  ?numero ∈ [0, r], r ∈ R
+ <numero>,
  numero ∈ [0, r], r ∈ R

eic2 ← eic2 - <?numero>,
  ?numero ∈ [0, r], r ∈ R
+ <numero>,
  numero ∈ [0, r], r ∈ R

eic3 ← eic3 - <?numero>,
  ?numero ∈ [0, r], r ∈ R
+ <numero>,
  numero ∈ [0, r], r ∈ R

eic4 ← eic4 - <?forma>,
  ?forma ∈ EC1
+ <forma>,
  forma ∈ EC1

eic5 ← eic5 - <?numero>,
  ?numero ∈ [0, n], n ∈ N
+ <numero>,
  numero ∈ [0, n], n ∈ N

eic6.1 ← eic6.1 - <?numero>,
  ?numero ∈ [0, r], r ∈ R
+ <numero>,
  numero ∈ [0, r], r ∈ R

eic6.2 ← eic6.2 - <?numero>,
  ?numero ∈ [0, r], r ∈ R
+ <numero>,
  numero ∈ [0, r], r ∈ R

eic6.3 ← eic6.3 - <?numero>,
  ?numero ∈ [0, r], r ∈ R
+ <numero>,
  numero ∈ [0, r], r ∈ R

eic6.4 ← eic6.4 - <?forma>,
  ?forma ∈ EC2
+ <forma>,
  forma ∈ EC2

```

<p>eip1 ← eip1 - &lt;?numero&gt;,                  ?numero ∈ [0, n], n ∈ N                  + &lt;numero&gt;,                  numero ∈ [0, n], n ∈ N</p>
<p>eip2.1 ← eip2.1 - &lt;?tipo&gt;,                  ?tipo ∈ [quarto, salaEstar, salaJantar, cozinha, casaDeBanho, despensa,outro]                  + &lt;tipo&gt;, tipo ∈ [quarto, salaEstar, salaJantar, cozinha, casaDeBanho, despensa,outro]</p>
<p>eip2.2 ← eip2.2 - &lt;?numero &gt;,                  ?numero ∈ [0, r], r ∈ R                  + &lt;numero&gt;,                  numero ∈ [0, r], r ∈ R</p>
<p>eip2.3 ← eip2.3 - &lt;?numero &gt;,                  ?numero ∈ [0, r], r ∈ R                  + &lt;numero&gt;,                  numero ∈ [0, r], r ∈ R</p>
<p>eip2.4 ← eip2.4 - &lt;?numero &gt;,                  ?numero ∈ [0, r], r ∈ R                  + &lt;numero&gt;,                  numero ∈ [0, r], r ∈ R</p>
<p>eip2.5 ← eip2.5 - &lt;?forma&gt;,                  ?forma ∈ EP1                  + &lt;forma&gt;,                  forma ∈ EP1</p>
<p>eip3.1 ← eip3.1 - &lt;?tipo&gt;,                  ?tipo ∈ [quarto, salaEstar, salaJantar, cozinha, casaDeBanho, despensa,outro]                  + &lt;tipo&gt;, tipo ∈ [quarto, salaEstar, salaJantar, cozinha, casaDeBanho, despensa,outro]</p>
<p>eip3.2 ← eip3.2 - &lt;?numero &gt;,                  ?numero ∈ [0, r], r ∈ R                  + &lt;numero&gt;,                  numero ∈ [0, r], r ∈ R</p>
<p>eip3.3 ← eip3.3 - &lt;?numero &gt;,                  ?numero ∈ [0, r], r ∈ R                  + &lt;numero&gt;,                  numero ∈ [0, r], r ∈ R</p>
<p>eip3.4 ← eip3.4 - &lt;?numero &gt;,                  ?numero ∈ [0, r], r ∈ R                  + &lt;numero&gt;,                  numero ∈ [0, r], r ∈ R</p>
<p>eip3.5 ← eip3.5 - &lt;?forma&gt;,                  ?forma ∈ EP2                  + &lt;forma&gt;,                  forma ∈ EP2</p>

Tabela A5.5 : Regra d3 da gramática descritiva, de Especificação do Espaço Interior do Edifício

## Anexo A5.6

### Fase B: Definição da Forma Inicial (I)

**Forma Inicial:** Inserção da forma inicial (I) do Lote. É definida a forma inicial do lote para onde se pretende que o edifício seja projetado. Ver Figura A5.6.

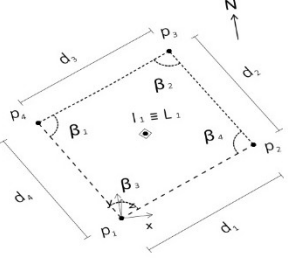
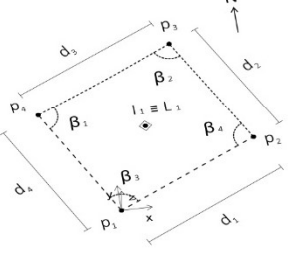
Gramáticas		Componentes
<p><b>Gramática do Envelope de Edifícios A</b></p> <p>Tipo de Gramática: Forma, Descritiva</p> <p>Álgebra &lt;formas,símbolos&gt;: &lt; <math>U_{33} V_{03}</math> &gt;</p> <p>Tipo de vista: Axonometria</p>		<p>Formas <math>\langle I_i, S_i, p_i \rangle</math>  <math>I_i, S_i, p_i = (x, y, z), i \in N^*</math>                  Símbolos <math>\langle L_i \rangle</math>  <math>L_i = (x, y, z), i \in N^*</math>                  Distâncias <math>\langle d_i \rangle</math>  <math>d_1, d_2, d_3, d_4 \in R</math>                  Ângulos <math>\langle \beta_i \rangle</math>  <math>0^\circ \leq \beta_i \leq 180^\circ, i \in N^*</math></p>
<p><b>Gramática do Lote L</b></p> <p>Tipo de Gramática: Forma</p> <p>Álgebra &lt;formas,símbolos&gt;: &lt; <math>U_{23} V_{03}</math> &gt;</p> <p>Tipo de vista: Axonometria</p>		<p>Formas <math>\langle I_i, S_i, p_i \rangle</math>  <math>I_i, S_i, p_i = (x, y, z), i \in N^*</math>                  Símbolos <math>\langle L_i \rangle</math>  <math>L_i = (x, y, z), i \in N^*</math>                  Distâncias <math>\langle d_i \rangle</math>  <math>d_1, d_2, d_3, d_4 \in R</math>                  Ângulos <math>\langle \beta_i \rangle</math>  <math>0^\circ \leq \beta_i \leq 180^\circ, i \in N^*</math></p>
<p><b>Gramática Descritiva D</b></p> <p>Tipo de Gramática: Descritiva</p> <p>Categoria: Contexto Legal Contexto Ambiental Programa Espaço Interior</p>	<p># cl1.1 # cl1.2 # cl2.1 # cl2.2 # cl3.1 # cl3.2 # cl4.1 # cl4.2 # cl5.1 # cl5.2 # cl6.1 # cl6.2                  # cl7.1 # cl7.2 # cl8 # cl9.1 # cl9.2 # cl10.1 # cl10.2 # cl11 # ca1.1 # ca1.2 # ca2 # ca3 #                  ca4 # ca5 # p1 # p2 # p3.1 # p3.2 # eic1 # eic2 # eic3 # eic4 # eic5 # eic6.1 # eic6.2 #                  eic6.3 # eic6.4 # eip1 # eip2.1 # eip2.2 # eip2.3 # eip2.4 # eip2.5 # eip3.1 # eip3.2 #                  eip3.3 # eip3.4 # eip3.5</p>	

Figura A5.6 : Forma Inicial da Gramática do Envelope de Edifícios

## Anexo A5.7

### Fase B: Definição da Forma Inicial (I)

**Regra 1:** Inserção de detalhes da forma inicial do lote. Trata-se de uma regra de aplicação opcional.

Ver Figura A5.7.

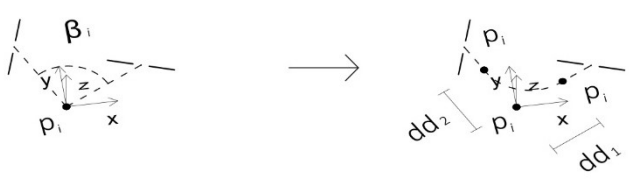
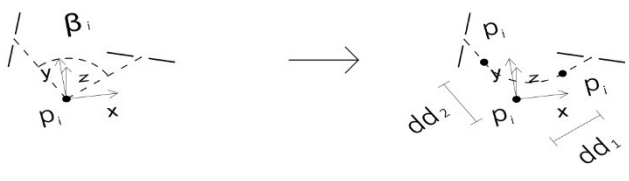
Gramáticas		Componentes
<p><b>Gramática do Envelope de Edifícios A</b></p> <p>Tipo de Gramática: Forma, Descritiva</p> <p>Álgebra &lt;formas,símbolos&gt;: &lt; <math>U_{33} V_{03}</math> &gt;</p> <p>Tipo de vista: Axonometria</p>		<p>Formas &lt; <math>I_i, S_i, p_i</math> &gt;  <math>I_i, S_i, p_i = (x, y, z), i \in N^*</math>                  Símbolos &lt; <math>L_i</math> &gt;  <math>L_i = (x, y, z), i \in N^*</math>                  Distâncias &lt; <math>dd_i</math> &gt;  <math>dd_1 = dd_2</math>  <math>dd_1, dd_2 \in R</math>                  Ângulos &lt; <math>\beta_i</math> &gt;  <math>0^\circ \leq \beta_i \leq 180^\circ, i \in N^*</math></p>
<p><b>Gramática do Lote L</b></p> <p>Tipo de Gramática: Forma</p> <p>Álgebra &lt;formas,símbolos&gt;: &lt; <math>U_{23} V_{03}</math> &gt;</p> <p>Tipo de vista: Axonometria</p>		<p>Formas &lt; <math>I_i, S_i, p_i</math> &gt;  <math>I_i, S_i, p_i = (x, y, z), i \in N^*</math>                  Símbolos &lt; <math>L_i</math> &gt;  <math>L_i = (x, y, z), i \in N^*</math>                  Distâncias &lt; <math>dd_i</math> &gt;  <math>dd_1 = dd_2</math>  <math>dd_1, dd_2 \in R</math>                  Ângulos &lt; <math>\beta_i</math> &gt;  <math>0^\circ \leq \beta_i \leq 180^\circ, i \in N^*</math></p>
<p><b>Gramática Descritiva D</b></p> <p>Tipo de Gramática: Descritiva</p> <p>Categoria: Contexto Legal Contexto Ambiental Programa Espaço Interior</p>	<p># cl1.1 # cl1.2 # cl2.1 # cl2.2 # cl3.1 # cl3.2 # cl4.1 # cl4.2 # cl5.1 # cl5.2 # cl6.1 # cl6.2 # cl7.1 # cl7.2 # cl8 # cl9.1 # cl9.2 # cl10.1 # cl10.2 # cl11 # ca1.1 # ca1.2 # ca2 # ca3 # ca4 # ca5 # p1 # p2 # p3.1 # p3.2 # eic1 # eic2 # eic3 # eic4 # eic5 # eic6.1 # eic6.2 # eic6.3 # eic6.4 # eip1 # eip2.1 # eip2.2 # eip2.3 # eip2.4 # eip2.5 # eip3.1 # eip3.2 # eip3.3 # eip3.4 # eip3.5</p>	

Figura A5.7 : Regra 1 da Gramática do Envelope de Edifícios

## Anexo A5.8

### Fase B: Definição da Forma Inicial (I)

**Regra 2:** Inserção da área permitida para a implantação do edifício. De acordo com o contexto legal, é definida a área no interior do lote onde é possível implantar o edifício. Ver Figura A5.8.

Gramáticas			Componentes
<p><b>Gramática do Envelope de Edifícios A</b></p> <p>Tipo de Gramática: Forma, Descritiva</p> <p>Álgebra &lt;formas,símbolos&gt;: &lt; <math>U_{33} V_{03}</math> &gt;</p> <p>Tipo de vista: Axonometria</p>			<p>Formas &lt; <math>I_i, S_i, p_i</math> &gt;  <math>I_i, S_i, p_i = (x, y, z), i \in N^*</math>                  Símbolos &lt; <math>L_i</math> &gt;  <math>L_i = (x, y, z), i \in N^*</math>                  Distâncias &lt; <math>d_i, e_i</math> &gt;  <math>d_1, d_2, d_3, d_4 \in R</math>  <math>e_1, e_2, e_3, e_4, e_5, e_6 \in R</math>                  Ângulos &lt; <math>\beta_i</math> &gt;  <math>0^\circ \leq \beta_i \leq 180^\circ, i \in N^*</math></p>
<p><b>Gramática do Lote L</b></p> <p>Tipo de Gramática: Forma</p> <p>Álgebra &lt;formas,símbolos&gt;: &lt; <math>U_{33} V_{03}</math> &gt;</p> <p>Tipo de vista: Axonometria</p>			<p>Formas &lt; <math>I_i, S_i, p_i</math> &gt;  <math>I_i, S_i, p_i = (x, y, z), i \in N^*</math>                  Símbolos &lt; <math>L_i</math> &gt;  <math>L_i = (x, y, z), i \in N^*</math>                  Distâncias &lt; <math>d_i, e_i</math> &gt;  <math>d_1, d_2, d_3, d_4 \in R</math>  <math>e_1, e_2, e_3, e_4, e_5, e_6 \in R</math>                  Ângulos &lt; <math>\beta_i</math> &gt;  <math>0^\circ \leq \beta_i \leq 180^\circ, i \in N^*</math></p>
<p><b>Gramática Descritiva D</b></p> <p>Tipo de Gramática: Descritiva</p> <p>Categoria: Contexto Legal Contexto Ambiental Programa Espaço Interior</p>	<p># cl1.1 # cl1.2 # cl2.1 # cl2.2 # cl3.1 # cl3.2 # cl4.1 # cl4.2 # cl5.1 # cl5.2 # cl6.1 # cl6.2                  # cl7.1 # cl7.2 # cl8 # cl9.1 # cl9.2 # cl10.1 # cl10.2 # cl11 # ca1.1 # ca1.2 # ca2 # ca3 #                  ca4 # ca5 # p1 # p2 # p3.1 # p3.2 # eic1 # eic2 # eic3 # eic4 # eic5 # eic6.1 # eic6.2 #                  eic6.3 # eic6.4 # eip1 # eip2.1 # eip2.2 # eip2.3 # eip2.4 # eip2.5 # eip3.1 # eip3.2 #                  eip3.3 # eip3.4 # eip3.5</p>		

Figura A5.8 : Regra 2 da Gramática do Envelope de Edifícios

# Anexo A5.9

## Fase B: Definição da Forma Inicial (I)

**Regra 3:** Inserção da forma inicial (I) do Envelope do Edifício. É definida a forma inicial do envelope do edifício, no interior da área onde é permitido implantar o edifício. Ver Figuras A5.9 e A5.9a.

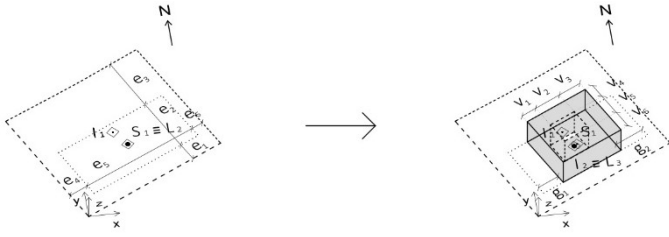
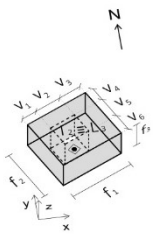
Gramáticas	Componentes	
<p><b>Gramática do Envelope de Edifícios A</b></p> <p>Tipo de Gramática: Forma, Descritiva</p> <p>Álgebra &lt;formas,símbolos&gt;: &lt; <math>U_{33} V_{03}</math> &gt;</p> <p>Tipo de vista: Axonometria</p>		
<p><b>Gramática do Edifício E</b></p> <p>Tipo de Gramática: Forma</p> <p>Álgebra &lt;formas,símbolos&gt;: &lt; <math>U_{33} V_{03}</math> &gt;</p> <p>Tipo de vista: Axonometria</p>		
<p><b>Gramática Descritiva D</b></p> <p>Tipo de Gramática: Descritiva</p> <p>Categoria: Contexto Legal Contexto Ambiental Programa Espaço Interior</p>	<pre> # cl1.1 # cl1.2 # cl2.1 # cl2.2 # cl3.1 # cl3.2 # cl4.1 # cl4.2 # cl5.1 # cl5.2 # cl6.1 # cl6.2 # cl7.1 # cl7.2 # cl8 # cl9.1 # cl9.2 # cl10.1 # cl10.2 # cl11 # ca1.1 # ca1.2 # ca2 # ca3 # ca4 # ca5 # p1 # p2 # p3.1 # p3.2 # eic1 # eic2 # eic3 # eic4 # eic5 # eic6.1 # eic6.2 # eic6.3 # eic6.4 # eip1 # eip2.1 # eip2.2 # eip2.3 # eip2.4 # eip2.5 # eip3.1 # eip3.2 # eip3.3 # eip3.4 # eip3.5  cl1.2 ← cl1.2 - &lt;?numero&gt;, ?numero ∈ [0,1] + &lt;numero&gt;, numero ∈ [0,1]  cl2.2 ← cl2.2 - &lt;?numero&gt;, ?numero ∈ [0,1] + &lt;numero&gt;, numero ∈ [0,1]  cl3.2 ← cl3.2 - &lt;?numero&gt;, ?numero ∈ [0,r], r ∈ R + &lt;numero&gt;, numero ∈ [0,r], r ∈ R  cl4.2 ← cl4.2 - &lt;?numero&gt;, ?numero ∈ [0,n], r ∈ N + &lt;numero&gt;, numero ∈ [0,n], r ∈ N  cl5.2 ← cl5.2 - &lt;?numero&gt;, ?numero ∈ [0,r], r ∈ R + &lt;numero&gt;, numero ∈ [0,r], r ∈ R  cl6.2 ← cl6.2 - &lt;?numero&gt;, ?numero ∈ [0,r], r ∈ R + &lt;numero&gt;, numero ∈ [0,r], r ∈ R                     </pre>	

Figura A5.9 : Regra 3 da Gramática do Envelope de Edifícios (parte 1)

<p><b>Gramática Descritiva D</b></p> <p>Tipo de Gramática:                  Descritiva</p> <p>Categoria:                  Contexto Legal                  Contexto Ambiental                  Programa                  Espaço Interior</p>	<p>c17.2 ← c17.2 - &lt;?numero&gt;,                  ?numero ∈ [0,r], r ∈ R                  + &lt;numero&gt;,                  numero ∈ [0,r], r ∈ R</p> <p>eic3 ← eic3 - &lt;?numero&gt;,                  ?numero ∈ [0,r], r ∈ R                  + &lt;numero&gt;,                  numero ∈ [0,r], r ∈ R</p> <p>eic6.3 ← eic6.3 - &lt;?numero&gt;,                  ?numero ∈ [0,r], r ∈ R                  + &lt;numero&gt;,                  numero ∈ [0,r], r ∈ R</p> <p>eip2.4 ← eip2.4 - &lt;?numero&gt;,                  ?numero ∈ [0,r], r ∈ R                  + &lt;numero&gt;,                  numero ∈ [0,r], r ∈ R</p> <p>eip3.4 ← eip3.4 - &lt;?numero&gt;,                  ?numero ∈ [0,r], r ∈ R                  + &lt;numero&gt;,                  numero ∈ [0,r], r ∈ R</p>	
---	---	--

Figura A5.9a : Regra 3 da Gramática do Envelope de Edifícios (parte 2)

## Anexo A5.10

### Fase B: Definição da Forma Inicial (I)

**Regra 3A:** Inserção de uma forma particular para a forma inicial (I) do Envelope do Edifício, em que o núcleo vazio central não existe. Ver Figuras A5.10 e A5.10a.

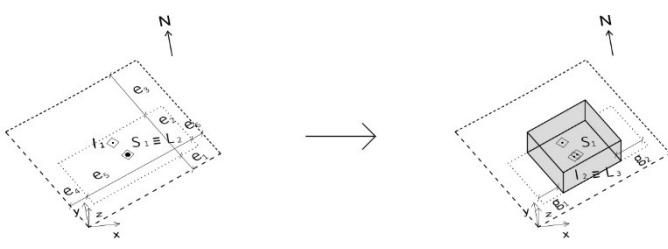
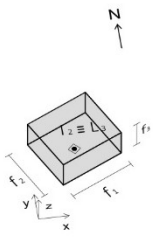
Gramáticas	Componentes	
<p><b>Gramática do Envelope de Edifícios A</b></p> <p>Tipo de Gramática: Forma, Descritiva</p> <p>Álgebra &lt;formas,símbolos&gt;: &lt; <math>U_{33} V_{03}</math> &gt;</p> <p>Tipo de vista: Axonometria</p>	 <p>Formas &lt; <math>I_i, S_i</math> &gt;  <math>I_i, S_i = (x, y, z), i \in N^*</math>                  Símbolos &lt; <math>L_i</math> &gt;  <math>L_i = (x, y, z), i \in N^*</math>                  Distâncias &lt; <math>e_i, f_i, g_i</math> &gt;                  Dimensões &lt; <math>v_i</math> &gt;  <math>i \in N^*</math>  <math>e_i, f_i, g_i \in R</math>  <math>v_1, v_2, v_3, v_4, v_5, v_6 = 0</math></p>	
<p><b>Gramática do Edifício E</b></p> <p>Tipo de Gramática: Forma</p> <p>Álgebra &lt;formas,símbolos&gt;: &lt; <math>U_{33} V_{03}</math> &gt;</p> <p>Tipo de vista: Axonometria</p>	 <p>Formas &lt; <math>I_i, S_i</math> &gt;  <math>I_i, S_i = (x, y, z), i \in N^*</math>                  Símbolos &lt; <math>L_i</math> &gt;  <math>L_i = (x, y, z), i \in N^*</math>                  Dimensões &lt; <math>f_i, v_i</math> &gt;  <math>i \in N^*</math>  <math>f_i \in R</math>  <math>v_1, v_2, v_3, v_4, v_5, v_6 = 0</math></p>	
<p><b>Gramática Descritiva D</b></p> <p>Tipo de Gramática: Descritiva</p> <p>Categoria: Contexto Legal Contexto Ambiental Programa Espaço Interior</p>	<pre># cl1.1 # cl1.2 # cl2.1 # cl2.2 # cl3.1 # cl3.2 # cl4.1 # cl4.2 # cl5.1 # cl5.2 # cl6.1 # cl6.2 # cl7.1 # cl7.2 # cl8 # cl9.1 # cl9.2 # cl10.1 # cl10.2 # cl11 # ca1.1 # ca1.2 # ca2 # ca3 # ca4 # ca5 # p1 # p2 # p3.1 # p3.2 # eic1 # eic2 # eic3 # eic4 # eic5 # eic6.1 # eic6.2 # eic6.3 # eic6.4 # eip1 # eip2.1 # eip2.2 # eip2.3 # eip2.4 # eip2.5 # eip3.1 # eip3.2 # eip3.3 # eip3.4 # eip3.5  cl1.2 ← cl1.2 - &lt;?numero&gt;, ?numero ∈ [0,1] + &lt;numero&gt;, numero ∈ [0,1]  cl2.2 ← cl2.2 - &lt;?numero&gt;, ?numero ∈ [0,1] + &lt;numero&gt;, numero ∈ [0,1]  cl3.2 ← cl3.2 - &lt;?numero&gt;, ?numero ∈ [0,r], r ∈ R + &lt;numero&gt;, numero ∈ [0,r], r ∈ R  cl4.2 ← cl4.2 - &lt;?numero&gt;, ?numero ∈ [0,n], r ∈ N + &lt;numero&gt;, numero ∈ [0,n], r ∈ N  cl5.2 ← cl5.2 - &lt;?numero&gt;, ?numero ∈ [0,r], r ∈ R + &lt;numero&gt;, numero ∈ [0,r], r ∈ R  cl6.2 ← cl6.2 - &lt;?numero&gt;, ?numero ∈ [0,r], r ∈ R + &lt;numero&gt;, numero ∈ [0,r], r ∈ R</pre>	

Figura A5.10 : Regra 3A da Gramática do Envelope de Edifícios (parte 1)

<p><b>Gramática Descritiva D</b></p> <p>Tipo de Gramática: Descritiva</p> <p>Categoria: Contexto Legal Contexto Ambiental Programa Espaço Interior</p>	<pre> ci7.2 ← ci7.2 - &lt;?numero&gt; ?numero ∈ [0,r], r ∈ R + &lt;numero&gt; numero ∈ [0,r], r ∈ R  eic3 ← eic3 - &lt;?numero&gt; ?numero ∈ [0,r], r ∈ R + &lt;numero&gt; numero ∈ [0,r], r ∈ R  eic6.3 ← eic6.3 - &lt;?numero&gt; ?numero ∈ [0,r], r ∈ R + &lt;numero&gt; numero ∈ [0,r], r ∈ R  eip2.4 ← eip2.4 - &lt;?numero&gt; ?numero ∈ [0,r], r ∈ R + &lt;numero&gt; numero ∈ [0,r], r ∈ R  eip3.4 ← eip3.4 - &lt;?numero&gt; ?numero ∈ [0,r], r ∈ R + &lt;numero&gt; numero ∈ [0,r], r ∈ R </pre>	
--	--	--

Figura A5.10a : Regra 3A da Gramática do Envelope de Edifícios (parte 2)

# Anexo A5.11

## Fase C: Definição da Orientação do Envelope do Edifício

**Regra 4:** Insere um operador de avaliação sobre o envelope do edifício. O objetivo do operador consiste em avaliar a irradiação incidente no envelope. A avaliação é feita na gramática dos operadores, a qual consiste numa gramática com um elevado grau de abstração, permitindo desse modo que qualquer forma possa ser avaliada de um modo expedito. Ver Figura A5.11.

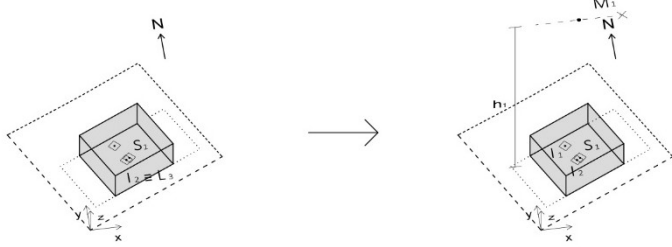
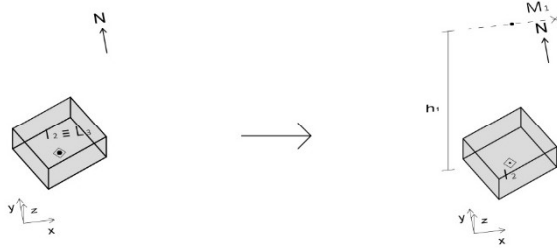
Gramáticas			Componentes
<p><b>Gramática do Envelope de Edifícios A</b></p> <p>Tipo de Gramática: Forma, Descritiva</p> <p>Álgebra &lt;formas,símbolos&gt;: &lt; <math>U_{33} V_{03}</math> &gt;</p> <p>Tipo de vista: Axonometria</p>		<p>Formas &lt; <math>I_i, S_i</math> &gt;  <math>I_i, S_i = (x,y,z), i \in N^*</math>                  Símbolos &lt; <math>L_i</math> &gt;  <math>L_i = (x,y,z), i \in N^*</math>                  Distâncias &lt; <math>h_i</math> &gt;  <math>i \in N^*, h_i \in R</math>                  Operadores                  &lt; <math>M_i, MG_i</math> &gt;  <math>M_1 = (x,y,z)</math>  <math>MG_{i1} = 0, MG_{i2} = 0</math>                  (ativa Gramática dos Operadores)</p>	
<p><b>Gramática do Edifício E</b></p> <p>Tipo de Gramática: Forma</p> <p>Álgebra &lt;formas,símbolos&gt;: &lt; <math>U_{33} V_{03}</math> &gt;</p> <p>Tipo de vista: Axonometria</p>		<p>Formas &lt; <math>I_i, S_i</math> &gt;  <math>I_i, S_i = (x,y,z), i \in N^*</math>                  Símbolos &lt; <math>L_i</math> &gt;  <math>L_i = (x,y,z), i \in N^*</math>                  Distâncias &lt; <math>h_i</math> &gt;  <math>i \in N^*, h_i \in R</math>                  Operadores                  &lt; <math>M_i, MG_i</math> &gt;  <math>M_1 = (x,y,z)</math>  <math>MG_{i2} = 0</math>                  (ativa Gramática dos Operadores)</p>	
<p><b>Gramática Descritiva D</b></p> <p>Tipo de Gramática: Descritiva</p> <p>Categoria: Contexto Legal Contexto Ambiental Programa Espaço Interior</p>	<p># cl1.1 # cl1.2 # cl2.1 # cl2.2 # cl3.1 # cl3.2 # cl4.1 # cl4.2 # cl5.1 # cl5.2 # cl6.1 # cl6.2 # cl7.1 # cl7.2 # cl8 # cl9.1 # cl9.2 # cl10.1 # cl10.2 # cl11 # ca1.1 # ca1.2 # ca2 # ca3 # ca4 # ca5 # p1 # p2 # p3.1 # p3.2 # eic1 # eic2 # eic3 # eic4 # eic5 # eic6.1 # eic6.2 # eic6.3 # eic6.4 # eip1 # eip2.1 # eip2.2 # eip2.3 # eip2.4 # eip2.5 # eip3.1 # eip3.2 # eip3.3 # eip3.4 # eip3.5</p>		

Figura A5.11 : Regra 4 da Gramática do Envelope de Edifícios

## Anexo A5.12

### Fase C: Definição da Orientação do Envelope do Edifício

**Regra 5:** Ativa a gramática dos operadores. Ver Figuras A5.12 e A5.12a.

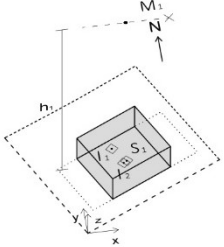
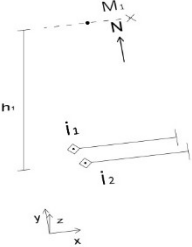
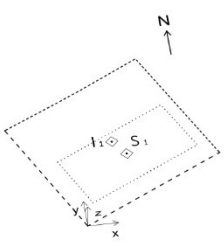
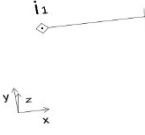
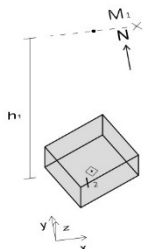
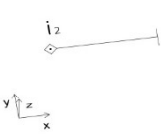
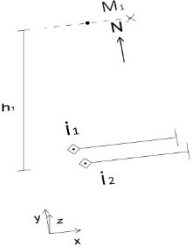
Gramáticas			Componentes
<p><b>Gramática do Envelope de Edifícios A</b></p> <p>Tipo de Gramática: Forma, Descritiva</p> <p>Álgebra &lt;formas,símbolos&gt;: &lt; <math>U_{33} V_{03}</math> &gt;</p> <p>Tipo de vista: Axonometria</p>			<p>Formas &lt; <math>I_i, i_i, S_i</math> &gt;  <math>I_i, i_i, S_i = (x, y, z), i \in N^*</math>                      Distâncias &lt; <math>h_i</math> &gt;  <math>i \in N^*, h_i \in R</math>                      Operadores                      &lt; <math>M_i, MG_i</math> &gt;  <math>M_1 = (x, y, z)</math>  <math>MG_i = 0, MG_i = 0</math>                      (ativa Gramática dos Operadores)</p>
<p><b>Gramática do Lote L</b></p> <p>Tipo de Gramática: Forma</p> <p>Álgebra &lt;formas,símbolos&gt;: &lt; <math>U_{23} V_{03}</math> &gt;</p> <p>Tipo de vista: Axonometria</p>			<p>Formas &lt; <math>I_i, i_i, S_i</math> &gt;  <math>I_i, i_i, S_i = (x, y, z), i \in N^*</math>                      Operadores &lt; <math>MG_i</math> &gt;  <math>MG_i = 0</math>                      (ativa Gramática dos Operadores)</p>
<p><b>Gramática do Edifício E</b></p> <p>Tipo de Gramática: Forma</p> <p>Álgebra &lt;formas,símbolos&gt;: &lt; <math>U_{33} V_{03}</math> &gt;</p> <p>Tipo de vista: Axonometria</p>			<p>Formas &lt; <math>I_i, i_i, S_i</math> &gt;  <math>I_i, i_i, S_i = (x, y, z), i \in N^*</math>                      Distâncias &lt; <math>h_i</math> &gt;  <math>i \in N^*, h_i \in R</math>                      Operadores                      &lt; <math>M_i, MG_i</math> &gt;  <math>M_1 = (x, y, z)</math>  <math>MG_i = 0</math>                      (ativa Gramática dos Operadores)</p>
<p><b>Gramática dos Operadores M</b></p> <p>Tipo de Gramática: Forma</p> <p>Álgebra &lt;formas,símbolos&gt;: &lt; <math>U_{13} V_{03}</math> &gt;</p> <p>Tipo de vista: Axonometria</p>			<p>Formas &lt; <math>i_i</math> &gt;  <math>i_i = (x, y, z), i \in N^*</math>                      Distâncias &lt; <math>h_i</math> &gt;  <math>i \in N^*, h_i \in R</math>                      Operadores                      &lt; <math>M_i, MG_i</math> &gt;  <math>M_1 = (x, y, z)</math>  <math>MG_i = 0, MG_i = 0</math>                      (ativa Gramática dos Operadores)</p>

Figura A5.12 : Regra 5 da Gramática do Envelope de Edifícios (parte 1)

Gramática Descritiva D	
Tipo de Gramática: Descritiva	# cl1.1 # cl1.2 # cl2.1 # cl2.2 # cl3.1 # cl3.2 # cl4.1 # cl4.2 # cl5.1 # cl5.2 # cl6.1 # cl6.2 # cl7.1 # cl7.2 # cl8 # cl9.1 # cl9.2 # cl10.1 # cl10.2 # cl11 # ca1.1 # ca1.2 # ca2 # ca3 # ca4 # ca5 # p1 # p2 # p3.1 # p3.2 # eic1 # eic2 # eic3 # eic4 # eic5 # eic6.1 # eic6.2 # eic6.3 # eic6.4 # eip1 # eip2.1 # eip2.2 # eip2.3 # eip2.4 # eip2.5 # eip3.1 # eip3.2 # eip3.3 # eip3.4 # eip3.5
Categoria:	
Contexto Legal	
Contexto Ambiental	
Programa	
Espaço Interior	

Figura A5.12a : Regra 5 da Gramática do Envelope de Edifícios (parte 2)

## Anexo A5.13

### Fase C: Definição da Orientação do Envelope do Edifício

**Regra 6:** Avalia a irradiação incidente no envelope do edifício. A avaliação é feita na gramática dos operadores. Ver Figura A5.13.

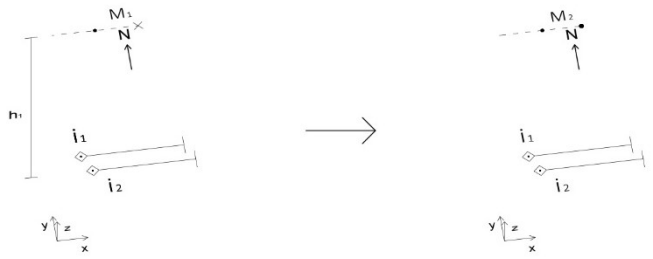
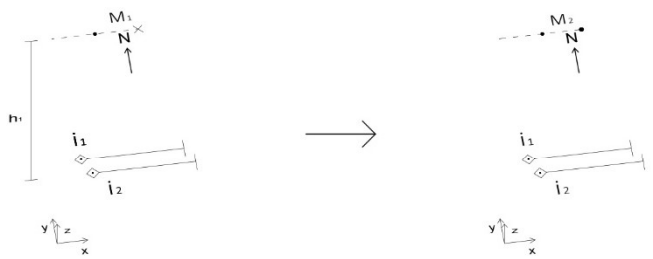
Gramáticas			Componentes
<p><b>Gramática do Envelope de Edifícios A</b></p> <p>Tipo de Gramática: Forma, Descritiva</p> <p>Álgebra &lt;formas,símbolos&gt;: <math>\langle U_{33} V_{03} \rangle</math></p> <p>Tipo de vista: Axonometria</p>			<p>Formas <math>\langle i_i \rangle</math>  <math>i_i = (x,y,z), i \in N^*</math>                      Distâncias <math>\langle h_i \rangle</math>  <math>i \in N^*, h_i \in R</math>                      Operadores <math>\langle M_i, MG_i \rangle</math>  <math>M_1, M_2 = (x,y,z)</math>  <math>MG_i = 1, MG_i = 1</math>                      (ativa a Visualização das Formas)                      Valores de Irradiação Incidente <math>\langle IR_i \rangle</math></p>
<p><b>Gramática dos Operadores M</b></p> <p>Tipo de Gramática: Forma</p> <p>Álgebra &lt;formas,símbolos&gt;: <math>\langle U_{13} V_{03} \rangle</math></p> <p>Tipo de vista: Axonometria</p>			<p>Formas <math>\langle i_i \rangle</math>  <math>i_i = (x,y,z), i \in N^*</math>                      Distâncias <math>\langle h_i \rangle</math>  <math>i \in N^*, h_i \in R</math>                      Operadores <math>\langle M_i, MG_i \rangle</math>  <math>M_1, M_2 = (x,y,z)</math>  <math>MG_i = 1, MG_i = 1</math>                      (ativa a Visualização das Formas)                      Valores de Irradiação Incidente <math>\langle IR_i \rangle</math></p>
<p><b>Gramática Descritiva D</b></p> <p>Tipo de Gramática: Descritiva</p> <p>Categoria: Contexto Legal, Contexto Ambiental, Programa, Espaço Interior</p>	<p># cl1.1 # cl1.2 # cl2.1 # cl2.2 # cl3.1 # cl3.2 # cl4.1 # cl4.2 # cl5.1 # cl5.2 # cl6.1 # cl6.2 # cl7.1 # cl7.2 # cl8 # cl9.1 # cl9.2 # cl10.1 # cl10.2 # cl11 # ca1.1 # ca1.2 # ca2 # ca3 # ca4 # ca5 # p1 # p2 # p3.1 # p3.2 # eic1 # eic2 # eic3 # eic4 # eic5 # eic6.1 # eic6.2 # eic6.3 # eic6.4 # eip1 # eip2.1 # eip2.2 # eip2.3 # eip2.4 # eip2.5 # eip3.1 # eip3.2 # eip3.3 # eip3.4 # eip3.5</p> <p>ca1.2 ← ca1.2 - &lt;?numero&gt;                      ?numero ∈ [0,n], n ∈ N                      + &lt;numero&gt;                      numero ∈ [0,n], n ∈ N</p> <p>ca2 ← ca2 - &lt;?numero&gt;                      ?numero ∈ [0,n], n ∈ N                      + &lt;numero&gt;                      numero ∈ [0,n], n ∈ N</p>		

Figura A5.13 : Regra 6 da Gramática do Envelope de Edifícios

## Anexo A5.14

### Fase C: Definição da Orientação do Envelope do Edifício

**Regra 7:** Devolução da forma avaliada. Fecha a gramática dos operadores e devolve a forma avaliada do envelope do edifício. Ver Figuras A5.14 e A5.14a.

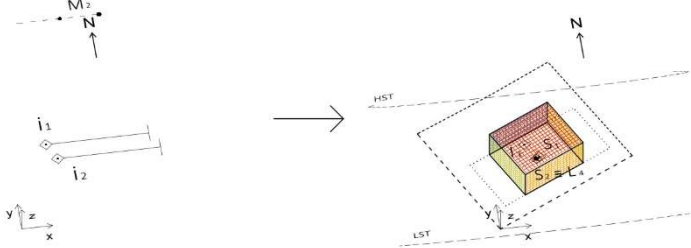
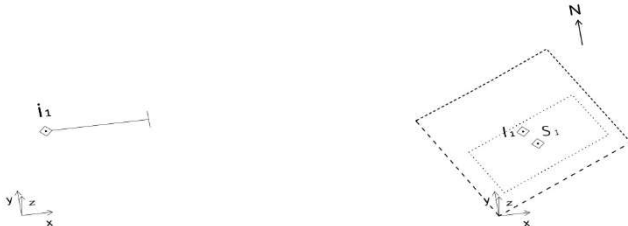
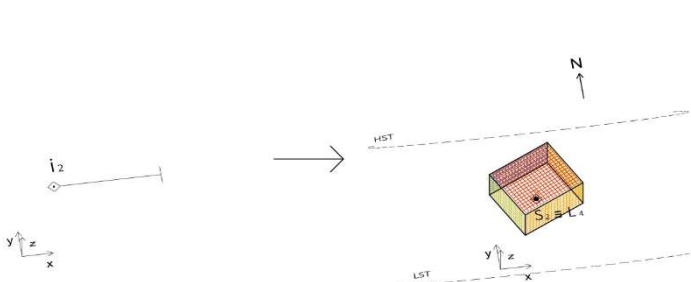

Gramáticas		Componentes
<p><b>Gramática do Envelope de Edifícios A</b></p> <p>Tipo de Gramática: Forma, Descritiva</p> <p>Álgebra &lt;formas,símbolos&gt;: &lt; <math>U_{33} V_{03}</math> &gt;</p> <p>Tipo de vista: Axonometria</p>		<p>Formas &lt; <math>I_i, i_i, S_i</math> &gt; Símbolos &lt; <math>L_i</math> &gt; Operadores &lt; <math>M_i, MG_i</math> &gt; Valores de Irradiação Incidente &lt; <math>IR_i</math> &gt;</p> <p>Valor Total de Irradiação Incidente: <math>IR_i</math>, kWh/m<sup>2</sup> <span style="color: yellow;">■</span></p> <p>Valores de Irradiação Incidente: Superfície 1: <math>IR_1</math>, kWh/m<sup>2</sup> <span style="color: red;">■</span> Superfície 2: <math>IR_2</math>, kWh/m<sup>2</sup> <span style="color: orange;">■</span> Superfície 3: <math>IR_3</math>, kWh/m<sup>2</sup> <span style="color: green;">■</span> Superfície 4: <math>IR_4</math>, kWh/m<sup>2</sup> <span style="color: lightgreen;">■</span> Superfície 5: <math>IR_5</math>, kWh/m<sup>2</sup> <span style="color: blue;">■</span></p>
<p><b>Gramática do Lote L</b></p> <p>Tipo de Gramática: Forma</p> <p>Álgebra &lt;formas,símbolos&gt;: &lt; <math>U_{23} V_{03}</math> &gt;</p> <p>Tipo de vista: Axonometria</p>		<p>Formas &lt; <math>I_i, S_i</math> &gt; Operadores &lt; <math>MG_i</math> &gt; <math>MG_i = 1</math> (ativa a Visualização das Formas)</p>
<p><b>Gramática do Edifício E</b></p> <p>Tipo de Gramática: Forma</p> <p>Álgebra &lt;formas,símbolos&gt;: &lt; <math>U_{33} V_{03}</math> &gt;</p> <p>Tipo de vista: Axonometria</p>		<p>Formas &lt; <math>I_i, i_i, S_i</math> &gt; Símbolos &lt; <math>L_i</math> &gt; Operadores &lt; <math>MG_i</math> &gt; <math>MG_i = 1</math> Valores de Irradiação Incidente &lt; <math>IR_i</math> &gt;</p> <p>Valor Total de Irradiação Incidente: <math>IR_i</math>, kWh/m<sup>2</sup> <span style="color: yellow;">■</span></p> <p>Valores de Irradiação Incidente: Superfície 1: <math>IR_1</math>, kWh/m<sup>2</sup> <span style="color: red;">■</span> Superfície 2: <math>IR_2</math>, kWh/m<sup>2</sup> <span style="color: orange;">■</span> Superfície 3: <math>IR_3</math>, kWh/m<sup>2</sup> <span style="color: green;">■</span> Superfície 4: <math>IR_4</math>, kWh/m<sup>2</sup> <span style="color: lightgreen;">■</span> Superfície 5: <math>IR_5</math>, kWh/m<sup>2</sup> <span style="color: blue;">■</span></p>
<p><b>Gramática dos Operadores M</b></p> <p>Tipo de Gramática: Forma</p> <p>Álgebra &lt;formas,símbolos&gt;: &lt; <math>U_{13} V_{03}</math> &gt;</p> <p>Tipo de vista: Axonometria</p>		<p>Formas &lt; <math>i_i</math> &gt; Símbolos &lt; <math>L_i</math> &gt; Operadores &lt; <math>M_i, MG_i</math> &gt; <math>M_2 = (x,y,z)</math> <math>MG_i = 1, MG_2 = 1</math> (ativa a Visualização das Formas)</p>

Figura A5.14 : Regra 7 da Gramática do Envelope de Edifícios (parte1)

Gramática Descritiva D	
Tipo de Gramática: Descritiva	# cl1.1 # cl1.2 # cl2.1 # cl2.2 # cl3.1 # cl3.2 # cl4.1 # cl4.2 # cl5.1 # cl5.2 # cl6.1 # cl6.2 # cl7.1 # cl7.2 # cl8 # cl9.1 # cl9.2 # cl10.1 # cl10.2 # cl11 # ca1.1 # ca1.2 # ca2 # ca3 # ca4 # ca5 # p1 # p2 # p3.1 # p3.2 # eic1 # eic2 # eic3 # eic4 # eic5 # eic6.1 # eic6.2 # eic6.3 # eic6.4 # eip1 # eip2.1 # eip2.2 # eip2.3 # eip2.4 # eip2.5 # eip3.1 # eip3.2 # eip3.3 # eip3.4 # eip3.5
Categoria: Contexto Legal Contexto Ambiental Programa Espaço Interior	

Figura A5.14a : Regra 7 da Gramática do Envelope de Edifícios (parte2)

## Anexo A5.15

### Fase C: Definição da Orientação do Envelope do Edifício

**Regra 8:** Insere um operador de rotação sobre o envelope do edifício. Ver Figuras A5.15 e A5.15a.

Gramáticas			Componentes
<p><b>Gramática do Envelope de Edifícios A</b></p> <p>Tipo de Gramática: Forma, Descritiva</p> <p>Álgebra &lt;formas,símbolos&gt;: <math>\langle U_{33} V_{03} \rangle</math></p> <p>Tipo de vista: Axonometria</p>			<p>Formas <math>\langle I_i, S_i \rangle</math></p> <p>Símbolos <math>\langle L_i \rangle</math></p> <p>Distâncias <math>\langle h_i \rangle</math></p> <p><math>i \in \mathbb{N}^*</math>, <math>h_i \in \mathbb{R}</math></p> <p>Operadores <math>\langle M_i, MG_i \rangle</math></p> <p><math>M_3 = (x,y,z)</math></p> <p><math>MG_{i_1} = 0, MG_{i_2} = 0</math></p> <p>(ativa a Gramática dos Operadores)</p> <p>Ângulos <math>\langle w_i \rangle</math></p> <p><math>w_1 = 360^\circ</math></p> <p>Formas <math>\langle I_i, S_i \rangle</math></p> <p>Símbolos <math>\langle L_i \rangle</math></p> <p>Distâncias <math>\langle h_i \rangle</math></p> <p>Operadores <math>\langle M_i, MG_i \rangle</math></p> <p>Valores de Irradiação Incidente <math>\langle IR_i \rangle</math></p> <p>Valor Total de Irradiação Incidente: <math>IR_i, kWh/m^2</math></p> <p>Valores de Irradiação Incidente:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Superfície 1: <math>IR_1, kWh/m^2</math> (Red)</li> <li>Superfície 2: <math>IR_2, kWh/m^2</math> (Orange)</li> <li>Superfície 3: <math>IR_3, kWh/m^2</math> (Yellow)</li> <li>Superfície 4: <math>IR_4, kWh/m^2</math> (Green)</li> <li>Superfície 5: <math>IR_5, kWh/m^2</math> (Blue)</li> </ul>
<p><b>Gramática do Edifício E</b></p> <p>Tipo de Gramática: Forma</p> <p>Álgebra &lt;formas,símbolos&gt;: <math>\langle U_{33} V_{03} \rangle</math></p> <p>Tipo de vista: Axonometria</p>			<p>Formas <math>\langle I_i, S_i \rangle</math></p> <p>Símbolos <math>\langle L_i \rangle</math></p> <p>Distâncias <math>\langle h_i \rangle</math></p> <p><math>i \in \mathbb{N}^*</math>, <math>h_i \in \mathbb{R}</math></p> <p>Operadores <math>\langle M_i, MG_i \rangle</math></p> <p><math>M_3 = (x,y,z)</math></p> <p><math>MG_{i_2} = 0</math></p> <p>(ativa a Gramática dos Operadores)</p> <p>Ângulos <math>\langle w_i \rangle</math></p> <p><math>w_1 = 360^\circ</math></p> <p>Formas <math>\langle I_i, S_i \rangle</math></p> <p>Símbolos <math>\langle L_i \rangle</math></p> <p>Distâncias <math>\langle h_i \rangle</math></p> <p>Operadores <math>\langle M_i, MG_i \rangle</math></p> <p>Valores de Irradiação Incidente <math>\langle IR_i \rangle</math></p> <p>Valor Total de Irradiação Incidente: <math>IR_i, kWh/m^2</math></p> <p>Valores de Irradiação Incidente:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Superfície 1: <math>IR_1, kWh/m^2</math> (Red)</li> <li>Superfície 2: <math>IR_2, kWh/m^2</math> (Orange)</li> <li>Superfície 3: <math>IR_3, kWh/m^2</math> (Yellow)</li> <li>Superfície 4: <math>IR_4, kWh/m^2</math> (Green)</li> <li>Superfície 5: <math>IR_5, kWh/m^2</math> (Blue)</li> </ul>

Figura A5.15 : Regra 8 da Gramática do Envelope de Edifícios (parte 1)

Gramática Descritiva D	
Tipo de Gramática: Descritiva	# cl1.1 # cl1.2 # cl2.1 # cl2.2 # cl3.1 # cl3.2 # cl4.1 # cl4.2 # cl5.1 # cl5.2 # cl6.1 # cl6.2 # cl7.1 # cl7.2 # cl8 # cl9.1 # cl9.2 # cl10.1 # cl10.2 # cl11 # ca1.1 # ca1.2 # ca2 # ca3 # ca4 # ca5 # p1 # p2 # p3.1 # p3.2 # eic1 # eic2 # eic3 # eic4 # eic5 # eic6.1 # eic6.2 # eic6.3 # eic6.4 # eip1 # eip2.1 # eip2.2 # eip2.3 # eip2.4 # eip2.5 # eip3.1 # eip3.2 # eip3.3 # eip3.4 # eip3.5
Categoria: Contexto Legal Contexto Ambiental Programa Espaço Interior	

Figura A5.15a : Regra 8 da Gramática do Envelope de Edifícios (parte 2)

## Anexo A5.16

### Fase C: Definição da Orientação do Envelope do Edifício

**Regra 9:** Ativa a gramática dos operadores. Ver Figuras A5.16 e A5.16a.

Gramáticas			Componentes
<p><b>Gramática do Envelope de Edifícios A</b></p> <p>Tipo de Gramática: Forma, Descritiva</p> <p>Álgebra &lt;formas,símbolos&gt;: &lt; <math>U_{33} V_{03}</math> &gt;</p> <p>Tipo de vista: Axonometria</p>			<p>Formas &lt; <math>l_i, i_i, S_i</math> &gt;                  Símbolos &lt; <math>L_i</math> &gt;                  Distâncias &lt; <math>h_i</math> &gt;  <math>i \in \mathbb{N}^*</math>, <math>h_i \in \mathbb{R}</math>                  Operadores &lt; <math>M_i, MG_i</math> &gt;  <math>MGi_1 = 0, MGi_2 = 0</math>                  (ativa a Gramática dos Operadores)                  Ângulos &lt; <math>w_i</math> &gt;  <math>W_1 = 360^\circ - k \times 10</math>  <math>0^\circ \leq W_1 \leq 360^\circ</math>  <math>k \in [0,36], k = k+1</math></p>
<p><b>Gramática do Lote L</b></p> <p>Tipo de Gramática: Forma</p> <p>Álgebra &lt;formas,símbolos&gt;: &lt; <math>U_{23} V_{03}</math> &gt;</p> <p>Tipo de vista: Axonometria</p>			<p>Formas &lt; <math>l_i, i_i, S_i</math> &gt;                  Operadores &lt; <math>MG_i</math> &gt;  <math>MGi_1 = 0</math>                  (ativa a Gramática dos Operadores)</p>
<p><b>Gramática do Edifício E</b></p> <p>Tipo de Gramática: Forma</p> <p>Álgebra &lt;formas,símbolos&gt;: &lt; <math>U_{33} V_{03}</math> &gt;</p> <p>Tipo de vista: Axonometria</p>			<p>Formas &lt; <math>l_i, i_i, S_i</math> &gt;                  Símbolos &lt; <math>L_i</math> &gt;                  Operadores &lt; <math>M_i, MG_i</math> &gt;  <math>M_3 = (x,y,z)</math>  <math>MGi_2 = 0</math>                  (ativa a Gramática dos Operadores)                  Ângulos &lt; <math>w_i</math> &gt;  <math>W_1 = 360^\circ - k \times 10</math>  <math>0^\circ \leq W_1 \leq 360^\circ</math>  <math>k \in [0,36], k = k+1</math></p>
<p><b>Gramática dos Operadores M</b></p> <p>Tipo de Gramática: Forma</p> <p>Álgebra &lt;formas,símbolos&gt;: &lt; <math>U_{13} V_{03}</math> &gt;</p> <p>Tipo de vista: Axonometria</p>			<p>Formas &lt; <math>i_i</math> &gt;                  Símbolos &lt; <math>L_i</math> &gt;                  Distâncias &lt; <math>h_i</math> &gt;                  Operadores &lt; <math>M_i, MG_i</math> &gt;  <math>M_3 = (x,y,z)</math>  <math>MGi_1 = 0, MGi_2 = 0</math>                  (ativa a Gramática dos Operadores)                  Ângulos &lt; <math>w_i</math> &gt;  <math>W_1 = 360^\circ - k \times 10</math>  <math>0^\circ \leq W_1 \leq 360^\circ</math>  <math>k \in [0,36], k = k+1</math></p>

Figura A5.16 : Regra 9 da Gramática do Envelope de Edifícios (parte 1)

Gramática Descritiva D	
Tipo de Gramática: Descritiva	# cl1.1 # cl1.2 # cl2.1 # cl2.2 # cl3.1 # cl3.2 # cl4.1 # cl4.2 # cl5.1 # cl5.2 # cl6.1 # cl6.2 # cl7.1 # cl7.2 # cl8 # cl9.1 # cl9.2 # cl10.1 # cl10.2 # cl11 # ca1.1 # ca1.2 # ca2 # ca3 # ca4 # ca5 # p1 # p2 # p3.1 # p3.2 # eic1 # eic2 # eic3 # eic4 # eic5 # eic6.1 # eic6.2 # eic6.3 # eic6.4 # eip1 # eip2.1 # eip2.2 # eip2.3 # eip2.4 # eip2.5 # eip3.1 # eip3.2 # eip3.3 # eip3.4 # eip3.5
Categoria: Contexto Legal Contexto Ambiental Programa Espaço Interior	

Figura A5.16a : Regra 9 da Gramática do Envelope de Edifícios (parte 2)

## Anexo A5.17

### Fase C: Definição da Orientação do Envelope do Edifício

**Regra 10:** Avalia a irradiação incidente no envelope do edifício rodado. A avaliação é feita na gramática dos operadores. Ver Figura A5.17.

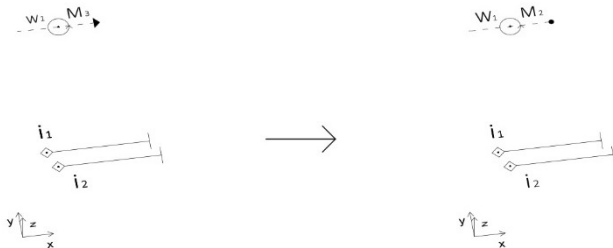
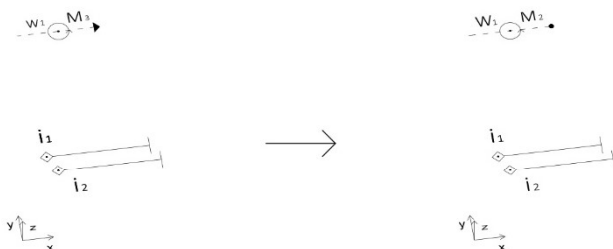
Gramáticas			Componentes
<p><b>Gramática do Envelope de Edifícios A</b></p> <p>Tipo de Gramática: Forma, Descritiva</p> <p>Álgebra &lt;formas,símbolos&gt;: &lt; U<sub>33</sub> V<sub>03</sub> &gt;</p> <p>Tipo de vista: Axonometria</p>			<p>Formas &lt; i<sub>i</sub> &gt;</p> <p>Operadores &lt;M<sub>i</sub>, MG<sub>i</sub>&gt;</p> <p>MG<sub>i1</sub> = 0, MG<sub>i2</sub> = 0 (continua na Gramática dos Operadores)</p> <p>V MG<sub>i1</sub> = 1, MG<sub>i2</sub> = 1 (ativa a Visualização das Formas)</p> <p>Ângulos &lt; w<sub>i</sub> &gt;</p> <p>0° ≤ W<sub>1</sub> ≤ 360°</p> <p>Valores de Irradiação Incidente &lt; IR<sub>i</sub> &gt;</p>
<p><b>Gramática dos Operadores M</b></p> <p>Tipo de Gramática: Forma</p> <p>Álgebra &lt;formas,símbolos&gt;: &lt; U<sub>13</sub> V<sub>03</sub> &gt;</p> <p>Tipo de vista: Axonometria</p>			<p>Formas &lt; i<sub>i</sub> &gt;</p> <p>Operadores &lt;M<sub>i</sub>, MG<sub>i</sub>&gt;</p> <p>MG<sub>i1</sub> = 0, MG<sub>i2</sub> = 0 (continua na Gramática dos Operadores)</p> <p>V MG<sub>i1</sub> = 1, MG<sub>i2</sub> = 1 (ativa a Visualização das Formas)</p> <p>Ângulos &lt; w<sub>i</sub> &gt;</p> <p>0° ≤ W<sub>1</sub> ≤ 360°</p> <p>Valores de Irradiação Incidente &lt; IR<sub>i</sub> &gt;</p>
<p><b>Gramática Descritiva D</b></p> <p>Tipo de Gramática: Descritiva</p> <p>Categoria: Contexto Legal, Contexto Ambiental, Programa, Espaço Interior</p>	<p># cl1.1 # cl1.2 # cl2.1 # cl2.2 # cl3.1 # cl3.2 # cl4.1 # cl4.2 # cl5.1 # cl5.2 # cl6.1 # cl6.2 # cl7.1 # cl7.2 # cl8 # cl9.1 # cl9.2 # cl10.1 # cl10.2 # cl11 # ca1.1 # ca1.2 # ca2 # ca3 # ca4 # ca5 # p1 # p2 # p3.1 # p3.2 # eic1 # eic2 # eic3 # eic4 # eic5 # eic6.1 # eic6.2 # eic6.3 # eic6.4 # eip1 # eip2.1 # eip2.2 # eip2.3 # eip2.4 # eip2.5 # eip3.1 # eip3.2 # eip3.3 # eip3.4 # eip3.5</p> <p>ca1.2 -- ca1.2 - &lt;?numero&gt;, ?numero ∈ [0,n], n ∈ N + &lt;numero&gt;, numero ∈ [0,n], n ∈ N</p> <p>ca2 -- ca2 - &lt;?numero&gt;, ?numero ∈ [0,n], n ∈ N + &lt;numero&gt;, numero ∈ [0,n], n ∈ N</p>		

Figura A5.17 : Regra 10 da Gramática do Envelope de Edifícios

# Anexo A5.18

## Fase C: Definição da Orientação do Envelope do Edifício

**Regra 11:** Devolução da forma avaliada. Fecha a gramática dos operadores e devolve a forma avaliada do envelope do edifício, após cada operação de rotação. Ver Figuras A5.18 e A5.18a.

Gramáticas		Componentes
<p><b>Gramática do Envelope de Edifícios A</b></p> <p>Tipo de Gramática: Forma, Descritiva</p> <p>Álgebra &lt;formas,símbolos&gt;: &lt; <math>U_{33} V_{03}</math> &gt;</p> <p>Tipo de vista: Axonometria</p>		<p>Formas &lt; <math>I_i, i_i, S_i</math> &gt; Símbolos &lt; <math>L_i</math> &gt; Operadores &lt; <math>M_i, MG_i</math> &gt; <math>MGi_1 = 1, MGi_2 = 1</math> (ativa a Visualização das Formas)</p> <p>Valor Total de Irradiação Incidente: <math>IR_i</math>, kWh/m<sup>2</sup></p> <p>Valores de Irradiação Incidente:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Superfície 1: <math>IR_1</math>, kWh/m<sup>2</sup></li> <li>Superfície 2: <math>IR_2</math>, kWh/m<sup>2</sup></li> <li>Superfície 3: <math>IR_3</math>, kWh/m<sup>2</sup></li> <li>Superfície 4: <math>IR_4</math>, kWh/m<sup>2</sup></li> <li>Superfície 5: <math>IR_5</math>, kWh/m<sup>2</sup></li> <li>Superfície 6: <math>IR_6</math>, kWh/m<sup>2</sup></li> </ul>
<p><b>Gramática do Lote L</b></p> <p>Tipo de Gramática: Forma</p> <p>Álgebra &lt;formas,símbolos&gt;: &lt; <math>U_{23} V_{03}</math> &gt;</p> <p>Tipo de vista: Axonometria</p>		<p>Formas &lt; <math>I_i, i_i, S_i</math> &gt; Operadores &lt; <math>MG_i</math> &gt; <math>MGi_1 = 1</math> (ativa a Visualização das Formas)</p>
<p><b>Gramática do Edifício E</b></p> <p>Tipo de Gramática: Forma</p> <p>Álgebra &lt;formas,símbolos&gt;: &lt; <math>U_{33} V_{03}</math> &gt;</p> <p>Tipo de vista: Axonometria</p>		<p>Formas &lt; <math>I_i, i_i, S_i</math> &gt; Símbolos &lt; <math>L_i</math> &gt; Operadores &lt; <math>M_i, MG_i</math> &gt; <math>MGi_2 = 1</math> (ativa a Visualização das Formas)</p> <p>Ângulos &lt; <math>w_i</math> &gt; <math>0^\circ \leq w_1 \leq 360^\circ</math></p> <p>Valores de Irradiação Incidente &lt; <math>IR_i</math> &gt;</p>
<p><b>Gramática dos Operadores M</b></p> <p>Tipo de Gramática: Forma</p> <p>Álgebra &lt;formas,símbolos&gt;: &lt; <math>U_{13} V_{03}</math> &gt;</p> <p>Tipo de vista: Axonometria</p>		<p>Formas &lt; <math>i_i</math> &gt; Operadores &lt; <math>M_i, MG_i</math> &gt; <math>MGi_1 = 1, MGi_2 = 1</math> (ativa a Visualização das Formas)</p> <p>Ângulos &lt; <math>w_i</math> &gt; <math>0^\circ \leq w_1 \leq 360^\circ</math></p>

Figura A5.18 : Regra 11 da Gramática do Envelope de Edifícios (parte1)

Gramática Descritiva D	
Tipo de Gramática: Descritiva	# cl1.1 # cl1.2 # cl2.1 # cl2.2 # cl3.1 # cl3.2 # cl4.1 # cl4.2 # cl5.1 # cl5.2 # cl6.1 # cl6.2 # cl7.1 # cl7.2 # cl8 # cl9.1 # cl9.2 # cl10.1 # cl10.2 # cl11 # ca1.1 # ca1.2 # ca2 # ca3 # ca4 # ca5 # p1 # p2 # p3.1 # p3.2 # eic1 # eic2 # eic3 # eic4 # eic5 # eic6.1 # eic6.2 # eic6.3 # eic6.4 # eip1 # eip2.1 # eip2.2 # eip2.3 # eip2.4 # eip2.5 # eip3.1 # eip3.2 # eip3.3 # eip3.4 # eip3.5
Categoria: Contexto Legal Contexto Ambiental Programa Espaço Interior	

Figura A5.18a : Regra 11 da Gramática do Envelope de Edifícios (parte2)

# Anexo A5.19

## Fase C: Definição da Orientação do Envelope do Edifício

**Regra 12:** Ativação da Gramática dos Operadores. Ativa a gramática dos operadores, após cada avaliação de uma forma rodada. Ver Figuras A5.19 e A5.19a.

Gramáticas			Componentes
<p><b>Gramática do Envelope de Edifícios A</b></p> <p>Tipo de Gramática: Forma, Descritiva</p> <p>Álgebra &lt;formas,símbolos&gt;: &lt; <math>U_{33} V_{03}</math> &gt;</p> <p>Tipo de vista: Axonometria</p>			<p>Formas &lt; <math>i_i, S_i</math> &gt;                  Símbolos &lt; <math>L_i</math> &gt;                  Distâncias &lt; <math>h_i</math> &gt;                  Operadores &lt; <math>M_i, MG_i</math> &gt;                  Valores de Irradiação Incidente &lt; <math>IR_i</math> &gt;</p> <p>Valor Total de Irradiação Incidente: <math>IR_i</math>, kWh/m<sup>2</sup></p> <p>Valores de Irradiação Incidente:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Superfície 1: <math>IR_1</math>, kWh/m<sup>2</sup></li> <li>Superfície 2: <math>IR_2</math>, kWh/m<sup>2</sup></li> <li>Superfície 3: <math>IR_3</math>, kWh/m<sup>2</sup></li> <li>Superfície 4: <math>IR_4</math>, kWh/m<sup>2</sup></li> <li>Superfície 5: <math>IR_5</math>, kWh/m<sup>2</sup></li> </ul>
<p><b>Gramática do Lote L</b></p> <p>Tipo de Gramática: Forma</p> <p>Álgebra &lt;formas,símbolos&gt;: &lt; <math>U_{23} V_{03}</math> &gt;</p> <p>Tipo de vista: Axonometria</p>			<p>Formas &lt; <math>i_i, S_i</math> &gt;                  Operadores &lt; <math>MG_i</math> &gt;  <math>MG_i = 0</math>                  (ativa a Gramática dos Operadores)</p>
<p><b>Gramática do Edifício E</b></p> <p>Tipo de Gramática: Forma</p> <p>Álgebra &lt;formas,símbolos&gt;: &lt; <math>U_{33} V_{03}</math> &gt;</p> <p>Tipo de vista: Axonometria</p>			<p>Formas &lt; <math>i_i, S_i</math> &gt;                  Símbolos &lt; <math>L_i</math> &gt;                  Operadores &lt; <math>M_i, MG_i</math> &gt;  <math>MG_i = 0</math>                  Valores de Irradiação Incidente &lt; <math>IR_i</math> &gt;</p> <p>Valor Total de Irradiação Incidente: <math>IR_i</math>, kWh/m<sup>2</sup></p> <p>Valores de Irradiação Incidente:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Superfície 1: <math>IR_1</math>, kWh/m<sup>2</sup></li> <li>Superfície 2: <math>IR_2</math>, kWh/m<sup>2</sup></li> <li>Superfície 3: <math>IR_3</math>, kWh/m<sup>2</sup></li> <li>Superfície 4: <math>IR_4</math>, kWh/m<sup>2</sup></li> <li>Superfície 5: <math>IR_5</math>, kWh/m<sup>2</sup></li> </ul>
<p><b>Gramática dos Operadores M</b></p> <p>Tipo de Gramática: Forma</p> <p>Álgebra &lt;formas,símbolos&gt;: &lt; <math>U_{13} V_{03}</math> &gt;</p> <p>Tipo de vista: Axonometria</p>			<p>Formas &lt; <math>i_i</math> &gt;                  Distâncias &lt; <math>h_i</math> &gt;                  Operadores &lt; <math>M_i, MG_i</math> &gt;  <math>MG_i = 0, MG_i = 0</math>                  (ativa a Gramática dos Operadores)                  Ângulos &lt; <math>w_i</math> &gt;  <math>w_i = 360^\circ</math></p>

Figura A5.19 : Regra 12 da Gramática do Envelope de Edifícios (parte1)

Gramática Descritiva D	
Tipo de Gramática: Descritiva	# cl1.1 # cl1.2 # cl2.1 # cl2.2 # cl3.1 # cl3.2 # cl4.1 # cl4.2 # cl5.1 # cl5.2 # cl6.1 # cl6.2 # cl7.1 # cl7.2 # cl8 # cl9.1 # cl9.2 # cl10.1 # cl10.2 # cl11 # ca1.1 # ca1.2 # ca2 # ca3 # ca4 # ca5 # p1 # p2 # p3.1 # p3.2 # eic1 # eic2 # eic3 # eic4 # eic5 # eic6.1 # eic6.2 # eic6.3 # eic6.4 # eip1 # eip2.1 # eip2.2 # eip2.3 # eip2.4 # eip2.5 # eip3.1 # eip3.2 # eip3.3 # eip3.4 # eip3.5
Categoria: Contexto Legal Contexto Ambiental Programa Espaço Interior	

Figura A5.19a : Regra 12 da Gramática do Envelope de Edifícios (parte 2)

## Anexo A5.20

### Fase C: Definição da Orientação do Envelope do Edifício

**Regra 13:** Roda os operadores de rotação na gramática dos operadores. Ver Figura A5.20.

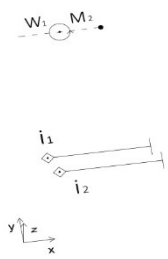
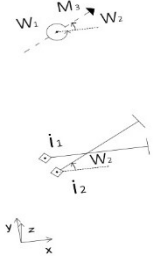
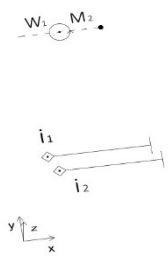
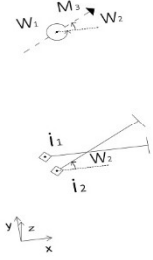
Gramáticas			Componentes
<p><b>Gramática do Envelope de Edifícios A</b></p> <p>Tipo de Gramática: Forma, Descritiva</p> <p>Álgebra &lt;formas,símbolos&gt;: &lt; <math>U_{33} V_{03}</math> &gt;</p> <p>Tipo de vista: Axonometria</p>			<p>Formas &lt; <math>i_i</math> &gt;</p> <p>Operadores &lt; <math>M_i, MG_i</math> &gt;</p> <p><math>MG_{i_1} = 0, MG_{i_2} = 0</math></p> <p>Ângulos &lt; <math>w_i</math> &gt;</p> <p><math>w_1 = 360^\circ - k * 10</math></p> <p><math>0^\circ \leq w_1 \leq 360^\circ</math></p> <p><math>w_2 = 10^\circ</math></p> <p><math>k \in [0,36], k = k+1</math></p> <p>Valores de Irradiação Incidente &lt; <math>IR_i</math> &gt;</p>
<p><b>Gramática dos Operadores M</b></p> <p>Tipo de Gramática: Forma</p> <p>Álgebra &lt;formas,símbolos&gt;: &lt; <math>U_{13} V_{03}</math> &gt;</p> <p>Tipo de vista: Axonometria</p>			<p>Formas &lt; <math>i_i</math> &gt;</p> <p>Operadores &lt; <math>M_i, MG_i</math> &gt;</p> <p><math>MG_{i_1} = 0, MG_{i_2} = 0</math></p> <p>Ângulos &lt; <math>w_i</math> &gt;</p> <p><math>w_1 = 360^\circ - k * 10</math></p> <p><math>0^\circ \leq w_1 \leq 360^\circ</math></p> <p><math>w_2 = 10^\circ</math></p> <p><math>k \in [0,36], k = k+1</math></p> <p>Valores de Irradiação Incidente &lt; <math>IR_i</math> &gt;</p>
<p><b>Gramática Descritiva D</b></p> <p>Tipo de Gramática: Descritiva</p> <p>Categoria: Contexto Legal Contexto Ambiental Programa Espaço Interior</p>	<p># cl1.1 # cl1.2 # cl2.1 # cl2.2 # cl3.1 # cl3.2 # cl4.1 # cl4.2 # cl5.1 # cl5.2 # cl6.1 # cl6.2 # cl7.1 # cl7.2 # cl8 # cl9.1 # cl9.2 # cl10.1 # cl10.2 # cl11 # ca1.1 # ca1.2 # ca2 # ca3 # ca4 # ca5 # p1 # p2 # p3.1 # p3.2 # eic1 # eic2 # eic3 # eic4 # eic5 # eic6.1 # eic6.2 # eic6.3 # eic6.4 # eip1 # eip2.1 # eip2.2 # eip2.3 # eip2.4 # eip2.5 # eip3.1 # eip3.2 # eip3.3 # eip3.4 # eip3.5</p>		

Figura A5.20 : Regra 13 da Gramática do Envelope de Edifícios

## Anexo A5.21

### Fase C: Definição da Orientação do Envelope do Edifício

**Regra 14:** Identifica a forma, na gramática dos operadores, com o melhor desempenho energético.

Ver Figura A5.21.

Gramáticas			Componentes
<p><b>Gramática do Envelope de Edifícios A</b></p> <p>Tipo de Gramática: Forma, Descritiva</p> <p>Álgebra &lt;formas,símbolos&gt;: &lt; <math>U_{33} V_{03}</math> &gt;</p> <p>Tipo de vista: Axonometria</p>			<p>Formas &lt; <math>i_i</math> &gt;</p> <p>Operadores &lt; <math>M_i, MG_i</math> &gt;</p> <p><math>MGi_1 = 0, MGi_2 = 0</math></p> <p>Ângulos &lt; <math>w_i</math> &gt;</p> <p><math>w_1 = 360^\circ - k * 10</math></p> <p><math>k = 36</math></p> <p><math>0^\circ \leq W_{3,4} \leq 360^\circ</math></p> <p>Valores de Irradiação Incidente &lt; <math>IR_i</math> &gt;</p>
<p><b>Gramática dos Operadores M</b></p> <p>Tipo de Gramática: Forma</p> <p>Álgebra &lt;formas,símbolos&gt;: &lt; <math>U_{13} V_{03}</math> &gt;</p> <p>Tipo de vista: Axonometria</p>			<p>Formas &lt; <math>i_i</math> &gt;</p> <p>Operadores &lt; <math>M_i, MG_i</math> &gt;</p> <p><math>MGi_1 = 0, MGi_2 = 0</math></p> <p>Ângulos &lt; <math>w_i</math> &gt;</p> <p><math>w_1 = 360^\circ - k * 10</math></p> <p><math>k = 36</math></p> <p><math>0^\circ \leq W_{3,4} \leq 360^\circ</math></p> <p>Valores de Irradiação Incidente &lt; <math>IR_i</math> &gt;</p>
<p><b>Gramática Descritiva D</b></p> <p>Tipo de Gramática: Descritiva</p> <p>Categoria: Contexto Legal Contexto Ambiental Programa Espaço Interior</p>	<p># cl1.1 # cl1.2 # cl2.1 # cl2.2 # cl3.1 # cl3.2 # cl4.1 # cl4.2 # cl5.1 # cl5.2 # cl6.1 # cl6.2 # cl7.1 # cl7.2 # cl8 # cl9.1 # cl9.2 # cl10.1 # cl10.2 # cl11 # ca1.1 # ca1.2 # ca2 # ca3 # ca4 # ca5 # p1 # p2 # p3.1 # p3.2 # eic1 # eic2 # eic3 # eic4 # eic5 # eic6.1 # eic6.2 # eic6.3 # eic6.4 # eip1 # eip2.1 # eip2.2 # eip2.3 # eip2.4 # eip2.5 # eip3.1 # eip3.2 # eip3.3 # eip3.4 # eip3.5</p>		

Figura A5.21 : Regra 14 da Gramática do Envelope de Edifícios

## Anexo A5.22

### Fase C: Definição da Orientação do Envelope do Edifício

**Regra 15:** Fecha a gramática dos operadores e devolve a forma avaliada do envelope do edifício com o melhor desempenho energético. Ver Figuras A5.22 e A5.22a.

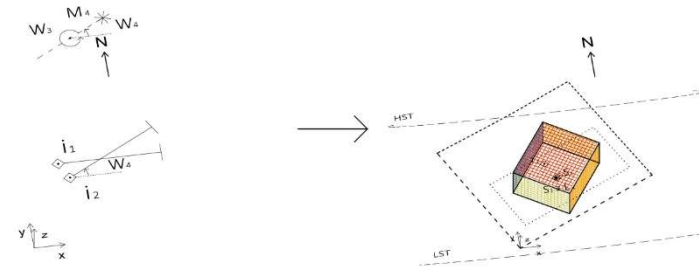

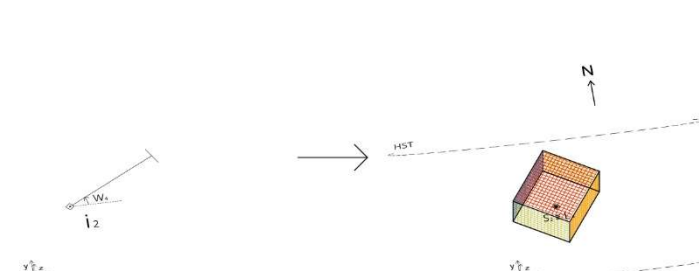

Gramáticas		Componentes
<p><b>Gramática do Envelope de Edifícios A</b></p> <p>Tipo de Gramática: Forma, Descritiva</p> <p>Álgebra &lt;formas,símbolos&gt;: &lt; <math>U_{33} V_{03}</math> &gt;</p> <p>Tipo de vista: Axonometria</p>		<p>Formas &lt; <math>I_i, i_i, S_i</math> &gt;                  Símbolos &lt; <math>L_i</math> &gt;                  Operadores &lt; <math>M_i, MG_i</math> &gt;  <math>MGi_1 = 1, MGi_2 = 1</math>                  Valores de Irradiação Incidente &lt; <math>IR_i</math> &gt;                  Valor Total de Irradiação Incidente:  <math>IR_i, kWh/m^2</math> <span style="color:orange">■</span>                  Valores de Irradiação Incidente:                  Superfície 1: <math>IR_1, kWh/m^2</math> <span style="color:red">■</span>                  Superfície 2: <math>IR_2, kWh/m^2</math> <span style="color:orange">■</span>                  Superfície 3: <math>IR_3, kWh/m^2</math> <span style="color:yellow">■</span>                  Superfície 4: <math>IR_4, kWh/m^2</math> <span style="color:green">■</span>                  Superfície 5: <math>IR_5, kWh/m^2</math> <span style="color:blue">■</span></p>
<p><b>Gramática do Lote L</b></p> <p>Tipo de Gramática: Forma</p> <p>Álgebra &lt;formas,símbolos&gt;: &lt; <math>U_{23} V_{03}</math> &gt;</p> <p>Tipo de vista: Axonometria</p>		<p>Formas &lt; <math>I_i, i_i, S_i</math> &gt;                  Operadores &lt; <math>MG_i</math> &gt;  <math>MGi_1 = 1</math>                  (ativa a Visualização das Formas)</p>
<p><b>Gramática do Edifício E</b></p> <p>Tipo de Gramática: Forma</p> <p>Álgebra &lt;formas,símbolos&gt;: &lt; <math>U_{33} V_{03}</math> &gt;</p> <p>Tipo de vista: Axonometria</p>		<p>Formas &lt; <math>I_i, i_i, S_i</math> &gt;                  Símbolos &lt; <math>L_i</math> &gt;                  Operadores &lt; <math>M_i, MG_i</math> &gt;  <math>MGi_2 = 1</math>                  Valores de Irradiação Incidente &lt; <math>IR_i</math> &gt;                  Valor Total de Irradiação Incidente:  <math>IR_i, kWh/m^2</math> <span style="color:orange">■</span>                  Valores de Irradiação Incidente:                  Superfície 1: <math>IR_1, kWh/m^2</math> <span style="color:red">■</span>                  Superfície 2: <math>IR_2, kWh/m^2</math> <span style="color:orange">■</span>                  Superfície 3: <math>IR_3, kWh/m^2</math> <span style="color:yellow">■</span>                  Superfície 4: <math>IR_4, kWh/m^2</math> <span style="color:green">■</span>                  Superfície 5: <math>IR_5, kWh/m^2</math> <span style="color:blue">■</span></p>
<p><b>Gramática dos Operadores M</b></p> <p>Tipo de Gramática: Forma</p> <p>Álgebra &lt;formas,símbolos&gt;: &lt; <math>U_{13} V_{03}</math> &gt;</p> <p>Tipo de vista: Axonometria</p>		<p>Formas &lt; <math>i_i</math> &gt;                  Símbolos &lt; <math>L_i</math> &gt;                  Operadores &lt; <math>M_i, MG_i</math> &gt;  <math>MGi_1 = 1, MGi_2 = 1</math>                  (ativa a Visualização das Formas)                  Ângulos &lt; <math>w_i</math> &gt;  <math>0^\circ \leq w_{3,4} \leq 360^\circ</math></p>

Figura A5.22 : Regra 15 da Gramática do Envelope de Edifícios (parte1)

Gramática Descritiva D	
Tipo de Gramática: Descritiva	# cl1.1 # cl1.2 # cl2.1 # cl2.2 # cl3.1 # cl3.2 # cl4.1 # cl4.2 # cl5.1 # cl5.2 # cl6.1 # cl6.2 # cl7.1 # cl7.2 # cl8 # cl9.1 # cl9.2 # cl10.1 # cl10.2 # cl11 # ca1.1 # ca1.2 # ca2 # ca3 # ca4 # ca5 # p1 # p2 # p3.1 # p3.2 # eic1 # eic2 # eic3 # eic4 # eic5 # eic6.1 # eic6.2 # eic6.3 # eic6.4 # eip1 # eip2.1 # eip2.2 # eip2.3 # eip2.4 # eip2.5 # eip3.1 # eip3.2 # eip3.3 # eip3.4 # eip3.5
Categoria:	
Contexto Legal	
Contexto Ambiental	
Programa	
Espaço Interior	

Figura A5.22a : Regra 15 da Gramática do Envelope de Edifícios (parte2)

## Anexo A5.23

### Fase D: Definição da Forma do Envelope do Edifício

**Regra 16:** Insere um operador de normalização, de acordo com uma posição escolhida do sol ao longo da sua trajetória anual, sobre uma superfície do envelope do edifício. Ver Figuras A5.23 e A5.23a.

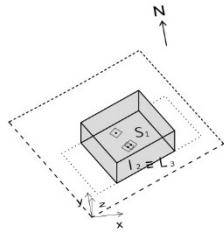
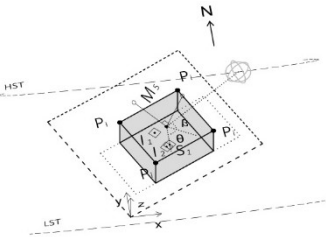
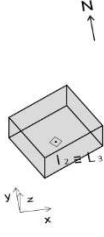
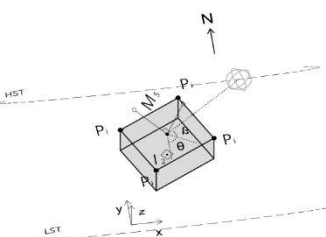
Gramáticas			Componentes
<p><b>Gramática do Envelope de Edifícios A</b></p> <p>Tipo de Gramática: Forma, Descritiva</p> <p>Álgebra &lt;formas,símbolos&gt;: &lt; <math>U_{33} V_{03}</math> &gt;</p> <p>Tipo de vista: Axonometria</p>			<p>Formas &lt; <math>I_i, S_i</math> &gt; Símbolos &lt; <math>L_i</math> &gt; Operadores &lt; <math>M_i, MG_i</math> &gt; <math>MGi_1 = 0, MGi_2 = 0</math> (ativa a Gramática dos Operadores) Ângulos &lt; <math>\theta, \beta</math> &gt; <math>0^\circ \leq \theta \leq 360^\circ,</math> <math>0^\circ \leq \beta \leq 180^\circ</math> Valores de Irradiação Incidente &lt; <math>IR_i</math> &gt; <math>4P_i</math> com maior altura Z</p>
<p><b>Gramática do Edifício E</b></p> <p>Tipo de Gramática: Forma</p> <p>Álgebra &lt;formas,símbolos&gt;: &lt; <math>U_{33} V_{03}</math> &gt;</p> <p>Tipo de vista: Axonometria</p>			<p>Formas &lt; <math>I_i, S_i</math> &gt; Símbolos &lt; <math>L_i</math> &gt; Operadores &lt; <math>M_i, MG_i</math> &gt; <math>MGi_2 = 0</math> (ativa a Gramática dos Operadores) Ângulos &lt; <math>\theta, \beta</math> &gt; <math>0^\circ \leq \theta \leq 360^\circ,</math> <math>0^\circ \leq \beta \leq 180^\circ</math> Valores de Irradiação Incidente &lt; <math>IR_i</math> &gt; <math>4P_i</math> com maior altura Z</p>

Figura A5.23 : Regra 16 da Gramática do Envelope de Edifícios (parte 1)

<p><b>Gramática das Superfícies T</b></p> <p>Tipo de Gramática: Forma</p> <p>Álgebra &lt;formas,símbolos&gt;: &lt; <math>U_{23} V_{03}</math> &gt;</p> <p>Tipo de vista: Axonometria</p> <p><b>Gramática Descritiva D</b></p> <p>Tipo de Gramática: Descritiva</p> <p>Categoria: Contexto Legal Contexto Ambiental Programa Espaço Interior</p>	<p># cl1.1 # cl1.2 # cl2.1 # cl2.2 # cl3.1 # cl3.2 # cl4.1 # cl4.2 # cl5.1 # cl5.2 # cl6.1 # cl6.2 # cl7.1 # cl7.2 # cl8 # cl9.1 # cl9.2 # cl10.1 # cl10.2 # cl11 # ca1.1 # ca1.2 # ca2 # ca3 # ca4 # ca5 # p1 # p2 # p3.1 # p3.2 # eic1 # eic2 # eic3 # eic4 # eic5 # eic6.1 # eic6.2 # eic6.3 # eic6.4 # eip1 # eip2.1 # eip2.2 # eip2.3 # eip2.4 # eip2.5 # eip3.1 # eip3.2 # eip3.3 # eip3.4 # eip3.5</p>	<p>Formas &lt; <math>I_i, S_i, P_i</math> &gt; Dimensões &lt; <math>a_i</math> &gt; <math>i \in N^*, a_i \in R</math> Operadores &lt; <math>M_i, MG_i</math> &gt; <math>MG_i = 0</math> (ativa a Gramática dos Operadores) Ângulos &lt; <math>\theta, \beta</math> &gt; <math>0^\circ \leq \theta \leq 360^\circ,</math> <math>0^\circ \leq \beta \leq 180^\circ</math> Valores de Irradiação Incidente &lt; <math>IR_i</math> &gt; <math>4P_i</math> com maior altura Z</p>
---	---	--

Figura A5.23a : Regra 16 da Gramática do Envelope de Edifícios (parte 2)

## Anexo A5.24

### Fase D: Definição da Forma do Envelope do Edifício

**Regra 17:** Ativa a gramática dos operadores, através do operador de normalização. Ver Figuras A5.24 e A5.24a.

Gramáticas			Componentes
<p><b>Gramática do Envelope de Edifícios A</b></p> <p>Tipo de Gramática: Forma, Descritiva</p> <p>Álgebra &lt;formas,símbolos&gt;: &lt; <math>U_{33} V_{03}</math> &gt;</p> <p>Tipo de vista: Axonometria</p>			<p>Formas &lt; <math>l_i, i_i, S_i, p_i</math> &gt; Operadores &lt; <math>M_i, MG_i</math> &gt; <math>MGi_1 = 0, MG_i2 = 0,</math> <math>MGi_3 = 0</math> (ativa a Gramática dos Operadores) Ângulos &lt; <math>\theta, \beta</math> &gt; <math>0^\circ \leq \theta \leq 360^\circ,</math> <math>0^\circ \leq \beta \leq 180^\circ</math> <math>4P_i</math> com maior altura Z</p>
<p><b>Gramática do Lote L</b></p> <p>Tipo de Gramática: Forma</p> <p>Álgebra &lt;formas,símbolos&gt;: &lt; <math>U_{23} V_{03}</math> &gt;</p> <p>Tipo de vista: Axonometria</p>			<p>Formas &lt; <math>i_i, S_i</math> &gt; Operadores &lt; <math>MG_i</math> &gt; <math>MGi_1 = 0</math> (ativa a Gramática dos Operadores)</p>
<p><b>Gramática do Edifício E</b></p> <p>Tipo de Gramática: Forma</p> <p>Álgebra &lt;formas,símbolos&gt;: &lt; <math>U_{33} V_{03}</math> &gt;</p> <p>Tipo de vista: Axonometria</p>			<p>Formas &lt; <math>l_i, S_i</math> &gt; Operadores &lt; <math>MG_i</math> &gt; <math>MGi_2 = 0</math> (ativa a Gramática dos Operadores)</p>
<p><b>Gramática das Superfícies T</b></p> <p>Tipo de Gramática: Forma</p> <p>Álgebra &lt;formas,símbolos&gt;: &lt; <math>U_{23} V_{03}</math> &gt;</p> <p>Tipo de vista: Axonometria</p>			<p>Formas &lt; <math>l_i, S_i, P_i, p_i</math> &gt; Dimensões &lt; <math>a_i</math> &gt; <math>i \in N^*, a_i \in R</math> Operadores &lt; <math>M_i, MG_i</math> &gt; <math>MGi_3 = 0</math> (ativa a Gramática dos Operadores) Ângulos &lt; <math>\theta, \beta</math> &gt; <math>0^\circ \leq \theta \leq 360^\circ</math> <math>0^\circ \leq \beta \leq 180^\circ</math> <math>4P_i</math> com maior altura Z</p>

Figura A5.24 : Regra 17 da Gramática do Envelope de Edifício (parte 1)

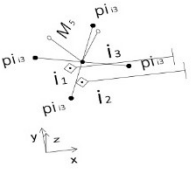
<p><b>Gramática dos Operadores M</b></p> <p>Tipo de Gramática: Forma</p> <p>Álgebra &lt;formas,símbolos&gt;: &lt; <math>U_{13} V_{03}</math> &gt;</p> <p>Tipo de vista: Axonometria</p> <p><b>Gramática Descritiva D</b></p> <p>Tipo de Gramática: Descritiva</p> <p>Categoria: Contexto Legal Contexto Ambiental Programa Espaço Interior</p>	 <p># cl1.1 # cl1.2 # cl2.1 # cl2.2 # cl3.1 # cl3.2 # cl4.1 # cl4.2 # cl5.1 # cl5.2 # cl6.1 # cl6.2 # cl7.1 # cl7.2 # cl8 # cl9.1 # cl9.2 # cl10.1 # cl10.2 # cl11 # ca1.1 # ca1.2 # ca2 # ca3 # ca4 # ca5 # p1 # p2 # p3.1 # p3.2 # eic1 # eic2 # eic3 # eic4 # eic5 # eic6.1 # eic6.2 # eic6.3 # eic6.4 # eip1 # eip2.1 # eip2.2 # eip2.3 # eip2.4 # eip2.5 # eip3.1 # eip3.2 # eip3.3 # eip3.4 # eip3.5</p>	<p>Formas &lt; <math>i_i, p_i</math> &gt; Operadores &lt; <math>M_i, MG_i</math> &gt; <math>MGi_1 = 0, MG_i2 = 0,</math> <math>MGi_3 = 0</math> (ativa a Gramática dos Operadores) Ângulos &lt; <math>\theta, \beta</math> &gt; <math>0^\circ \leq \theta \leq 360^\circ</math> <math>0^\circ \leq \beta \leq 180^\circ</math></p>
--	--	--

Figura A5.24a : Regra 17 da Gramática do Envelope de Edifício (parte 2)

## Anexo A5.25

### Fase D: Definição da Forma do Envelope do Edifício

**Regra 18:** Projeta a superfície selecionada do envelope no plano definido pelo operador de normalização. A nova superfície obtida é perpendicular aos raios da posição escolhida do sol. Ver Figura A5.25.

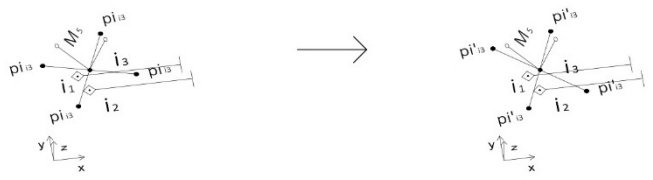
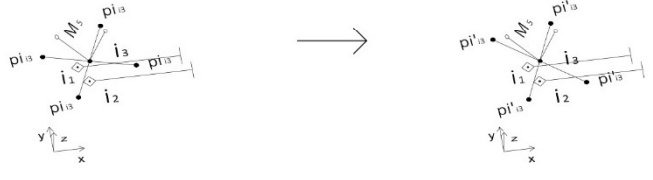
Gramáticas		Componentes
<p><b>Gramática do Envelope de Edifícios A</b></p> <p>Tipo de Gramática: Forma, Descritiva</p> <p>Álgebra &lt;formas,símbolos&gt;: &lt; <math>U_{33} V_{03}</math> &gt;</p> <p>Tipo de vista: Axonometria</p>		<p>Formas &lt; <math>i_j, p_i</math> &gt; Operadores &lt; <math>M_j, MG_i</math> &gt; <math>MGi_1 = 0, MGi_2 = 0,</math> <math>MGi_3 = 0</math></p>
<p><b>Gramática dos Operadores M</b></p> <p>Tipo de Gramática: Forma</p> <p>Álgebra &lt;formas,símbolos&gt;: &lt; <math>U_{13} V_{03}</math> &gt;</p> <p>Tipo de vista: Axonometria</p>		<p>Formas &lt; <math>i_j, p_i</math> &gt; Operadores &lt; <math>M_j, MG_i</math> &gt; <math>MGi_1 = 0, MGi_2 = 0,</math> <math>MGi_3 = 0</math></p>
<p><b>Gramática Descritiva D</b></p> <p>Tipo de Gramática: Descritiva</p> <p>Categoria: Contexto Legal Contexto Ambiental Programa Espaço Interior</p>	<p># cl1.1 # cl1.2 # cl2.1 # cl2.2 # cl3.1 # cl3.2 # cl4.1 # cl4.2 # cl5.1 # cl5.2 # cl6.1 # cl6.2 # cl7.1 # cl7.2 # cl8 # cl9.1 # cl9.2 # cl10.1 # cl10.2 # cl11 # ca1.1 # ca1.2 # ca2 # ca3 # ca4 # ca5 # p1 # p2 # p3.1 # p3.2 # eic1 # eic2 # eic3 # eic4 # eic5 # eic6.1 # eic6.2 # eic6.3 # eic6.4 # eip1 # eip2.1 # eip2.2 # eip2.3 # eip2.4 # eip2.5 # eip3.1 # eip3.2 # eip3.3 # eip3.4 # eip3.5</p>	

Figura A5.25 : Regra 18 da Gramática do Envelope de Edifícios

## Anexo A5.26

### Fase D: Definição da Forma do Envelope do Edifício

**Regra 19:** Avalia a irradiação incidente no envelope do edifício transformado (superfície normalizada e outras). A avaliação é feita na gramática dos operadores. Ver Figura A5.26.

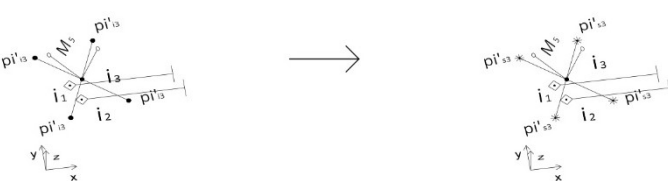
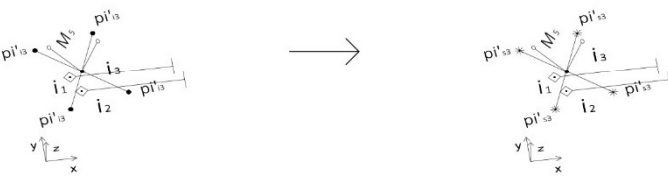
Gramáticas		Componentes
<p><b>Gramática do Envelope de Edifícios A</b></p> <p>Tipo de Gramática: Forma, Descritiva</p> <p>Álgebra &lt;formas,símbolos&gt;: &lt; <math>U_{33} V_{03}</math> &gt;</p> <p>Tipo de vista: Axonometria</p>		<p>Formas <math>\langle i_i, p_i \rangle</math> Operadores <math>\langle M_i, MG_i \rangle</math> <math>MG_i = 1, MG_2 = 1,</math> <math>MG_3 = 1</math> (ativa a Visualização das Formas) Valor de Irradiação Incidente <math>\langle IR_i \rangle</math></p>
<p><b>Gramática dos Operadores M</b></p> <p>Tipo de Gramática: Forma</p> <p>Álgebra &lt;formas,símbolos&gt;: &lt; <math>U_{13} V_{03}</math> &gt;</p> <p>Tipo de vista: Axonometria</p>		<p>Formas <math>\langle i_i, p_i \rangle</math> Operadores <math>\langle M_i, MG_i \rangle</math> <math>MG_i = 1, MG_2 = 1,</math> <math>MG_3 = 1</math> (ativa a Visualização das Formas) Valores de Irradiação Incidente <math>\langle IR_i \rangle</math></p>
<p><b>Gramática Descritiva D</b></p> <p>Tipo de Gramática: Descritiva</p> <p>Categoria: Contexto Legal Contexto Ambiental Programa Espaço Interior</p>	<p># cl1.1 # cl1.2 # cl2.1 # cl2.2 # cl3.1 # cl3.2 # cl4.1 # cl4.2 # cl5.1 # cl5.2 # cl6.1 # cl6.2 # cl7.1 # cl7.2 # cl8 # cl9.1 # cl9.2 # cl10.1 # cl10.2 # cl11 # ca1.1 # ca1.2 # ca2 # ca3 # ca4 # ca5 # p1 # p2 # p3.1 # p3.2 # eic1 # eic2 # eic3 # eic4 # eic5 # eic6.1 # eic6.2 # eic6.3 # eic6.4 # eip1 # eip2.1 # eip2.2 # eip2.3 # eip2.4 # eip2.5 # eip3.1 # eip3.2 # eip3.3 # eip3.4 # eip3.5</p> <p>ca1.2 ← ca1.2 - &lt;?numero&gt;, ?numero ∈ [0,n], n ∈ N + &lt;numero&gt;, numero ∈ [0,n], n ∈ N</p> <p>ca2 ← ca2 - &lt;?numero&gt;, ?numero ∈ [0,n], n ∈ N + &lt;numero&gt;, numero ∈ [0,n], n ∈ N</p>	

Figura A5.26 :Regra 19 da Gramática do Envelope de Edifícios

## Anexo A5.27

### Fase D: Definição da Forma do Envelope do Edifício

**Regra 20:** Fecha a gramática dos operadores e devolve a forma transformada do envelope do edifício, após a normalização da superfície escolhida. Ver Figuras A5.27 e A5.27a.

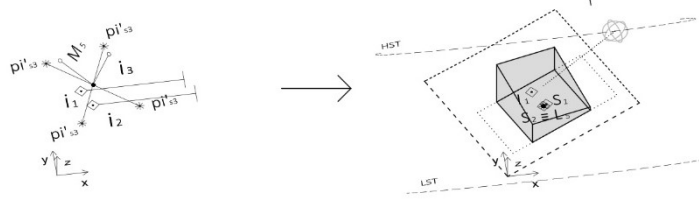
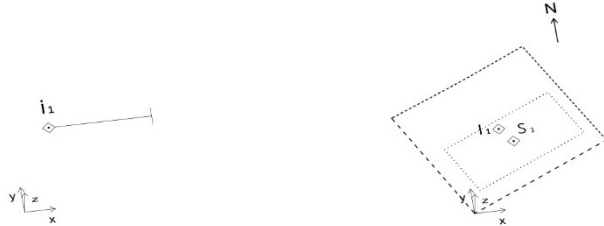

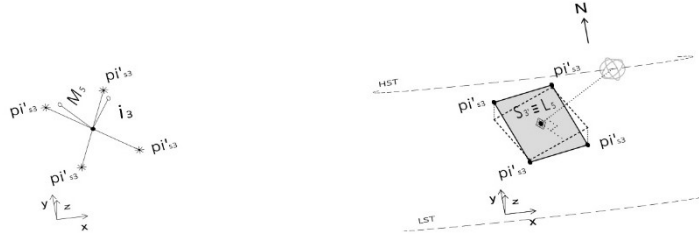
Gramáticas		Componentes
<p><b>Gramática do Envelope de Edifícios A</b></p> <p>Tipo de Gramática: Forma, Descritiva</p> <p>Álgebra &lt;formas,símbolos&gt;: &lt; <math>U_{33} V_{03}</math> &gt;</p> <p>Tipo de vista: Axonometria</p>		<p>Formas &lt; <math>I_i, i_i, S_i, p_i</math> &gt;                  Símbolos &lt; <math>L_i</math> &gt;                  Operadores &lt; <math>M_i, MG_i</math> &gt;  <math>MG_i_1 = 1, MG_i_2 = 1,</math>  <math>MG_i_3 = 1</math> (ativa a                  Visualização das                  Formas)                  Valores de Irradiação                  Incidente &lt; <math>IR_i</math> &gt;</p>
<p><b>Gramática do Lote L</b></p> <p>Tipo de Gramática: Forma</p> <p>Álgebra &lt;formas,símbolos&gt;: &lt; <math>U_{23} V_{03}</math> &gt;</p> <p>Tipo de vista: Axonometria</p>		<p>Formas &lt; <math>I_i, i_i, S_i</math> &gt;                  Operadores &lt; <math>MG_i</math> &gt;  <math>MG_i_1 = 1</math> (ativa a                  Visualização das                  Formas)</p>
<p><b>Gramática do Edifício E</b></p> <p>Tipo de Gramática: Forma</p> <p>Álgebra &lt;formas,símbolos&gt;: &lt; <math>U_{33} V_{03}</math> &gt;</p> <p>Tipo de vista: Axonometria</p>		<p>Formas &lt; <math>I_i, i_i, S_i</math> &gt;                  Operadores &lt; <math>MG_i</math> &gt;  <math>MG_i_2 = 1</math> (ativa a                  Visualização das                  Formas)                  Valores de Irradiação                  Incidente &lt; <math>IR_i</math> &gt;</p>
<p><b>Gramática das Superfícies T</b></p> <p>Tipo de Gramática: Forma</p> <p>Álgebra &lt;formas,símbolos&gt;: &lt; <math>U_{23} V_{03}</math> &gt;</p> <p>Tipo de vista: Axonometria</p>		<p>Formas &lt; <math>I_i, i_i, S_i, p_i</math> &gt;                  Símbolos &lt; <math>L_i</math> &gt;                  Operadores &lt; <math>M_i, MG_i</math> &gt;  <math>MG_i_3 = 1</math>                  (ativa a Visualização                  das Formas)                  Valores de Irradiação                  Incidente &lt; <math>IR_i</math> &gt;</p>

Figura A5.27 : Regra 20 da Gramática do Envelope de Edifícios (parte 1)

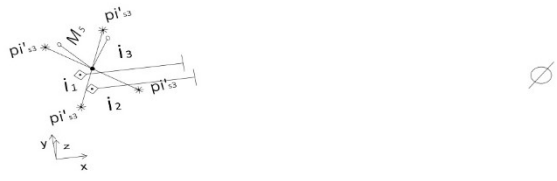
<p><b>Gramática dos Operadores M</b></p> <p>Tipo de Gramática: Forma</p> <p>Álgebra &lt;formas,símbolos&gt;: &lt; <math>U_{13} V_{03}</math> &gt;</p> <p>Tipo de vista: Axonometria</p> <p><b>Gramática Descritiva D</b></p> <p>Tipo de Gramática: Descritiva</p> <p>Categoria: Contexto Legal Contexto Ambiental Programa Espaço Interior</p>	 <p># cl1.1 # cl1.2 # cl2.1 # cl2.2 # cl3.1 # cl3.2 # cl4.1 # cl4.2 # cl5.1 # cl5.2 # cl6.1 # cl6.2 # cl7.1 # cl7.2 # cl8 # cl9.1 # cl9.2 # cl10.1 # cl10.2 # cl11 # ca1.1 # ca1.2 # ca2 # ca3 # ca4 # ca5 # p1 # p2 # p3.1 # p3.2 # eic1 # eic2 # eic3 # eic4 # eic5 # eic6.1 # eic6.2 # eic6.3 # eic6.4 # eip1 # eip2.1 # eip2.2 # eip2.3 # eip2.4 # eip2.5 # eip3.1 # eip3.2 # eip3.3 # eip3.4 # eip3.5</p>	<p>Formas &lt; <math>i_i</math> &gt; Operadores &lt; <math>M_i, MG_i</math> &gt; <math>MGi_1 = 1, MGi_2 = 1,</math> <math>MGi_3 = 1</math> (ativa a Visualização das Formas) Valores de Irradiação Incidente &lt; <math>IR_i</math> &gt;</p>
---	--	--

Figura A5.27a : Regra 20 da Gramática do Envelope de Edifícios (parte 2)

## Anexo A5.28

### Fase D: Definição da Forma do Envelope do Edifício

**Regra 21:** Mostra a avaliação da irradiação incidente na forma transformada do envelope do edifício, após a normalização da superfície escolhida. Ver Figura A5.28.

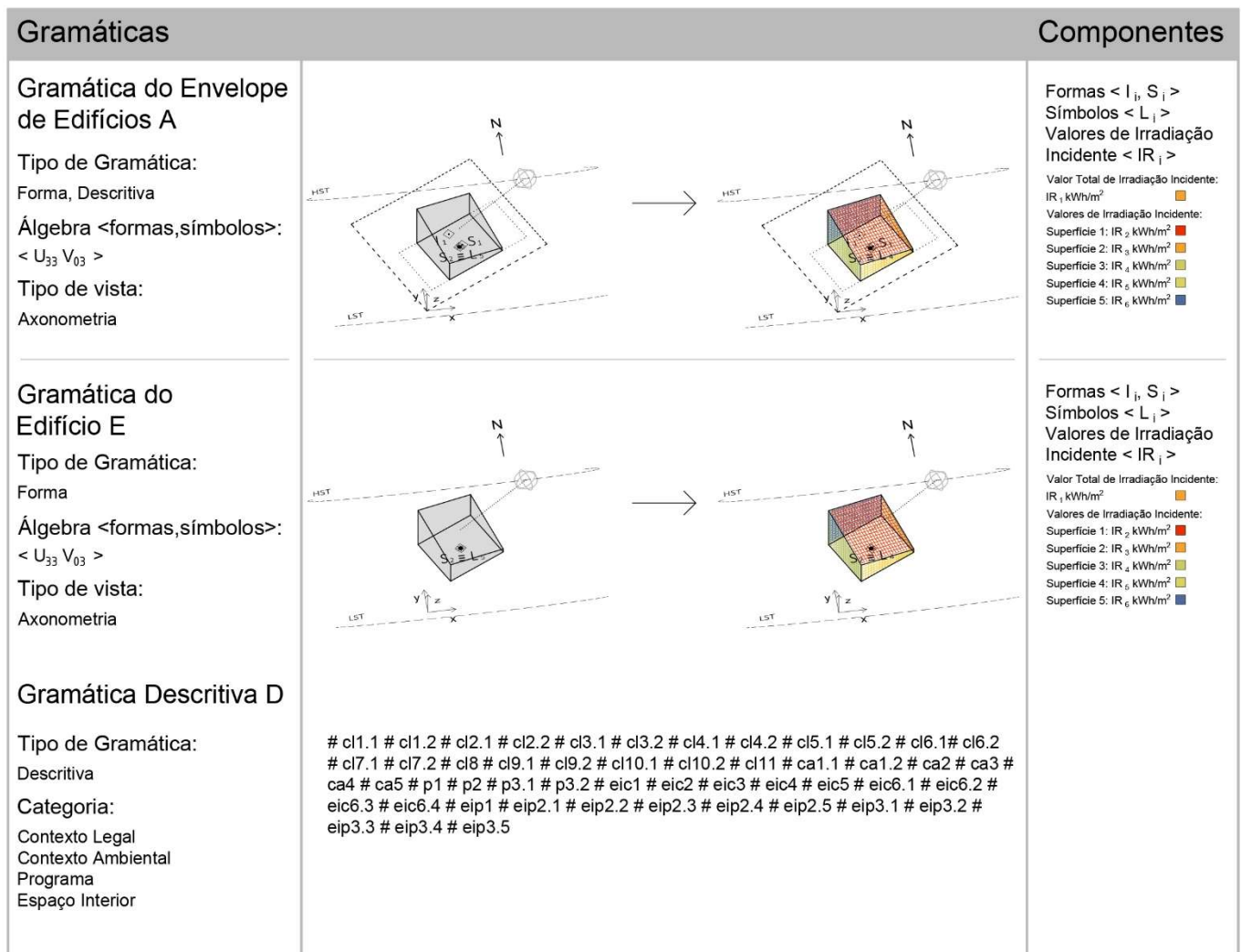


Figura A5.28 : Regra 21 da Gramática do Envelope de Edifícios

## Anexo A5.29

### Fase D: Definição da Forma do Envelope do Edifício

**Regra 22:** Insere um operador de divisão sobre uma superfície do envelope do edifício. Ver Figuras A5.29 e A5.29a.

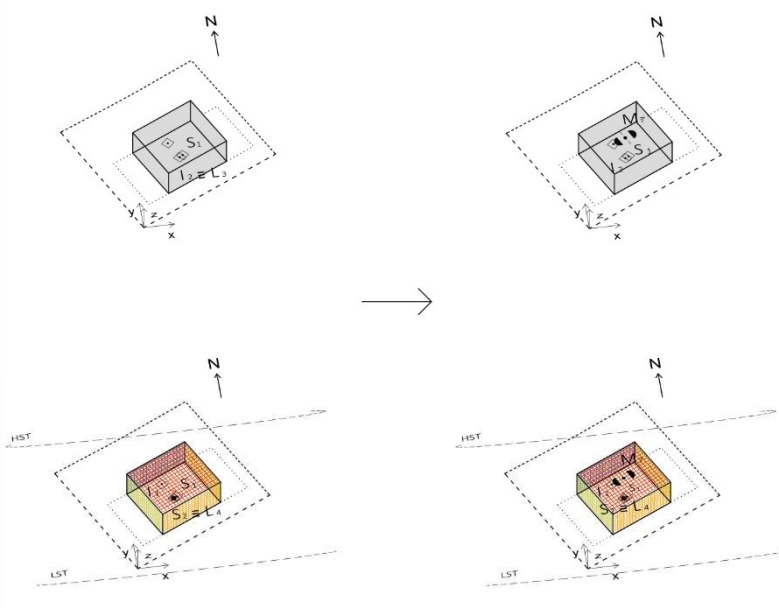
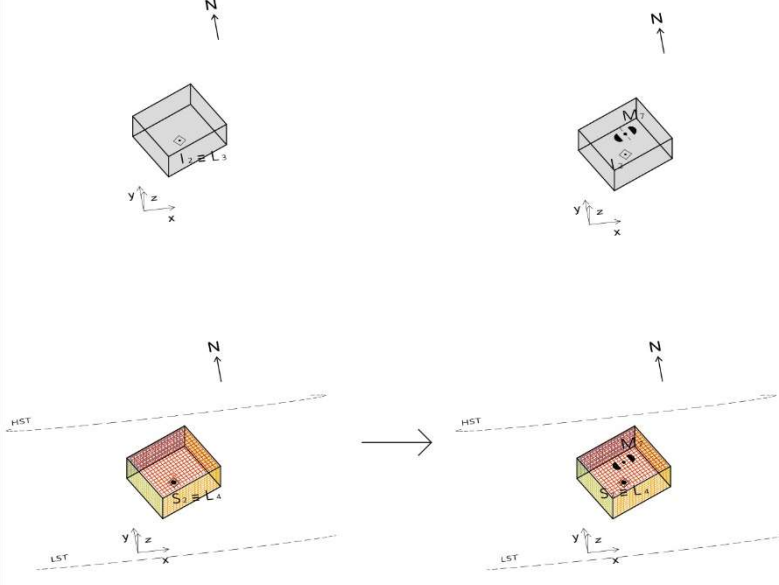
Gramáticas			Componentes
<p><b>Gramática do Envelope de Edifícios A</b></p> <p>Tipo de Gramática: Forma, Descritiva</p> <p>Álgebra &lt;formas,símbolos&gt;: &lt; <math>U_{33} V_{03}</math> &gt;</p> <p>Tipo de vista: Axonometria</p>			<p>Shapes &lt; <math>I_i, S_i</math> &gt; Labels &lt; <math>L_i</math> &gt; Operators &lt; <math>M_i, MG_i</math> &gt; <math>MGi_1 = 0, MGi_2 = 0</math> (activates Operators Grammar) Values of Incident Radiation &lt; <math>IR_i</math> &gt;</p>
<p><b>Gramática do Edifício E</b></p> <p>Tipo de Gramática: Forma</p> <p>Álgebra &lt;formas,símbolos&gt;: &lt; <math>U_{33} V_{03}</math> &gt;</p> <p>Tipo de vista: Axonometria</p>			<p>Shapes &lt; <math>I_i, S_i</math> &gt; Labels &lt; <math>L_i</math> &gt; Operators &lt; <math>M_i, MG_i</math> &gt; <math>MGi_1 = 0, MGi_2 = 0</math> (activates Operators Grammar) Values of Incident Radiation &lt; <math>IR_i</math> &gt;</p>

Figura A5.29 : Regra 22 da Gramática do Envelope de Edifícios (parte 1)

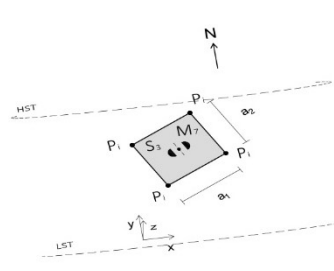
<p><b>Gramática das Superfícies T</b></p> <p>Tipo de Gramática: Forma</p> <p>Álgebra &lt;formas,símbolos&gt;: &lt; <math>U_{23} V_{03}</math> &gt;</p> <p>Tipo de vista: Axonometria</p> <p><b>Gramática Descritiva D</b></p> <p>Tipo de Gramática: Descritiva</p> <p>Categoria: Contexto Legal Contexto Ambiental Programa Espaço Interior</p>	 <p># cl1.1 # cl1.2 # cl2.1 # cl2.2 # cl3.1 # cl3.2 # cl4.1 # cl4.2 # cl5.1 # cl5.2 # cl6.1 # cl6.2 # cl7.1 # cl7.2 # cl8 # cl9.1 # cl9.2 # cl10.1 # cl10.2 # cl11 # ca1.1 # ca1.2 # ca2 # ca3 # ca4 # ca5 # p1 # p2 # p3.1 # p3.2 # eic1 # eic2 # eic3 # eic4 # eic5 # eic6.1 # eic6.2 # eic6.3 # eic6.4 # eip1 # eip2.1 # eip2.2 # eip2.3 # eip2.4 # eip2.5 # eip3.1 # eip3.2 # eip3.3 # eip3.4 # eip3.5</p>	<p>Formas &lt; <math>l_i, S_i, P_i</math> &gt; Símbolos &lt; <math>L_i</math> &gt; Dimensões &lt; <math>a_i</math> &gt; <math>i \in \mathbb{N}^*</math>, <math>a_i \in \mathbb{R}</math> Operadores &lt; <math>M_i, MG_i</math> &gt; <math>MG_i = 0</math> (ativa a Gramática dos Operadores) Valores de Irradiação Incidente &lt; <math>IR_i</math> &gt;</p>
---	--	---

Figura A5.29a : Regra 22 da Gramática do Envelope de Edifícios (parte 2)

## Anexo A5.30

### Fase D: Definição da Forma do Envelope do Edifício

**Regra 23:** Ativa a gramática dos operadores, através do operador de divisão. Ver Figuras A5.30 e A5.30a.

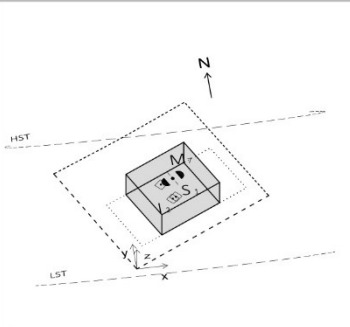
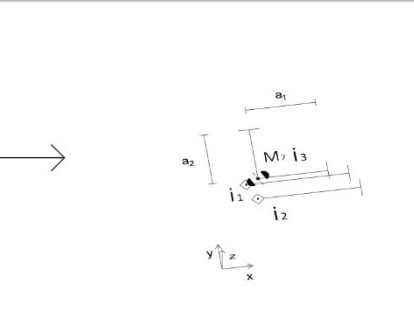
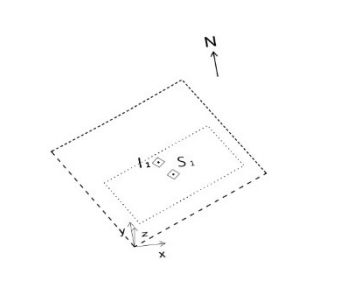
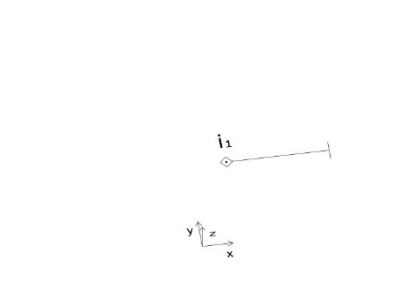
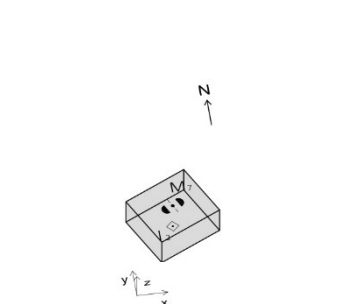
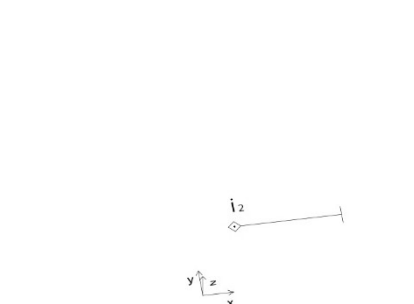
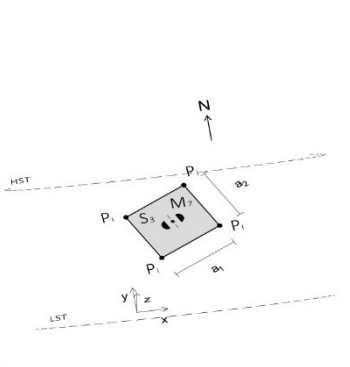
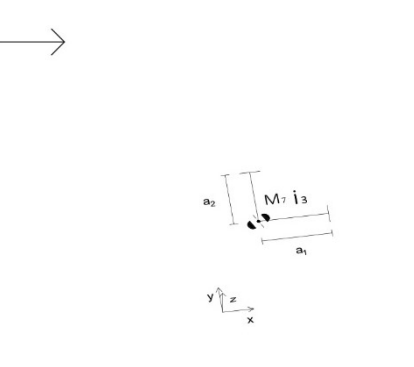
Gramáticas			Componentes
<p><b>Gramática do Envelope de Edifícios A</b></p> <p>Tipo de Gramática: Forma, Descritiva</p> <p>Álgebra &lt;formas,símbolos&gt;: &lt; <math>U_{33} V_{03}</math> &gt;</p> <p>Tipo de vista: Axonometria</p>			<p>Formas &lt; <math>I_i, i_i, S_i</math> &gt; Dimensões &lt; <math>a_i</math> &gt; <math>i \in \mathbb{N}^*</math>, <math>a_i \in \mathbb{R}</math> Operadores &lt; <math>M_i, MG_i</math> &gt; <math>MG_i_1 = 0</math>, <math>MG_i_2 = 0</math>, <math>MG_i_3 = 0</math> (ativa a Gramática dos Operadores)</p>
<p><b>Gramática do Lote L</b></p> <p>Tipo de Gramática: Forma</p> <p>Álgebra &lt;formas,símbolos&gt;: &lt; <math>U_{23} V_{03}</math> &gt;</p> <p>Tipo de vista: Axonometria</p>			<p>Formas &lt; <math>I_i, i_i, S_i</math> &gt; Operadores &lt; <math>MG_i</math> &gt; <math>MG_i = 0</math> (ativa a Gramática dos Operadores)</p>
<p><b>Gramática do Edifício E</b></p> <p>Tipo de Gramática: Forma</p> <p>Álgebra &lt;formas,símbolos&gt;: &lt; <math>U_{33} V_{03}</math> &gt;</p> <p>Tipo de vista: Axonometria</p>			<p>Formas &lt; <math>I_i, i_i, S_i</math> &gt; Operadores &lt; <math>M_i, MG_i</math> &gt; <math>MG_i_2 = 0</math> (ativa a Gramática dos Operadores)</p>
<p><b>Gramática das Superfícies T</b></p> <p>Tipo de Gramática: Forma</p> <p>Álgebra &lt;formas,símbolos&gt;: &lt; <math>U_{23} V_{03}</math> &gt;</p> <p>Tipo de vista: Axonometria</p>			<p>Formas &lt; <math>I_i, S_i, P_i</math> &gt; Dimensões &lt; <math>a_i</math> &gt; <math>i \in \mathbb{N}^*</math>, <math>a_i \in \mathbb{R}</math> Operadores &lt; <math>M_i, MG_i</math> &gt; <math>MG_i_3 = 0</math> (ativa a Gramática dos Operadores)</p>

Figura A5.30 : Regra 23 da Gramática do Envelope de Edifícios (parte 1)

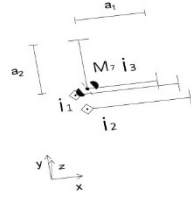
<p><b>Gramática dos Operadores M</b></p> <p>Tipo de Gramática: Forma</p> <p>Álgebra &lt;formas,símbolos&gt;: &lt; <math>U_{13} V_{03}</math> &gt;</p> <p>Tipo de vista: Axonometria</p> <p><b>Gramática Descritiva D</b></p> <p>Tipo de Gramática: Descritiva</p> <p>Categoria: Contexto Legal Contexto Ambiental Programa Espaço Interior</p>	 <p># cl1.1 # cl1.2 # cl2.1 # cl2.2 # cl3.1 # cl3.2 # cl4.1 # cl4.2 # cl5.1 # cl5.2 # cl6.1 # cl6.2 # cl7.1 # cl7.2 # cl8 # cl9.1 # cl9.2 # cl10.1 # cl10.2 # cl11 # ca1.1 # ca1.2 # ca2 # ca3 # ca4 # ca5 # p1 # p2 # p3.1 # p3.2 # eic1 # eic2 # eic3 # eic4 # eic5 # eic6.1 # eic6.2 # eic6.3 # eic6.4 # eip1 # eip2.1 # eip2.2 # eip2.3 # eip2.4 # eip2.5 # eip3.1 # eip3.2 # eip3.3 # eip3.4 # eip3.5</p>	<p>Formas &lt; <math>i_j</math> &gt; Dimensões &lt; <math>a_i</math> &gt; <math>i \in \mathbb{N}^*</math>, <math>a_i \in \mathbb{R}</math></p> <p>Operadores &lt; <math>M_j, MG_i</math> &gt; <math>MG_i = 0</math>, <math>MG_i = 0</math>, <math>MG_i = 0</math> (ativa a Gramática dos Operadores)</p>
--	--	--

Imagem A5.30a : Regra 23 da Gramática do Envelope de Edifícios (parte 2)

## Anexo A5.31

### Fase D: Definição da Forma do Envelope do Edifício

**Regra 24:** Divide uma superfície retangular em duas superfícies retangulares semelhantes, na gramática dos operadores e através do operador de divisão. Ver Figura A5.31.

Gramáticas		Componentes
<p><b>Gramática do Envelope de Edifícios A</b></p> <p>Tipo de Gramática: Forma, Descritiva</p> <p>Álgebra &lt;formas,símbolos&gt;: &lt; <math>U_{33} V_{03}</math> &gt;</p> <p>Tipo de vista: Axonometria</p>		<p>Formas &lt; <math>i_i</math> &gt; Dimensões &lt; <math>a_i, b_i, c_i</math> &gt; <math>i \in \mathbb{N}^*</math>, <math>a_i, b_i, c_i \in \mathbb{R}</math> Operadores &lt; <math>M_i, MG_i</math> &gt; <math>MGi_1 = 0, MG_i2 = 0,</math> <math>MGi_3 = 0</math></p>
<p><b>Gramática dos Operadores M</b></p> <p>Tipo de Gramática: Forma</p> <p>Álgebra &lt;formas,símbolos&gt;: &lt; <math>U_{13} V_{03}</math> &gt;</p> <p>Tipo de vista: Axonometria</p>		<p>Formas &lt; <math>i_i</math> &gt; Dimensões &lt; <math>a_i, b_i, c_i</math> &gt; <math>i \in \mathbb{N}^*</math>, <math>a_i, b_i, c_i \in \mathbb{R}</math> Operadores &lt; <math>M_i, MG_i</math> &gt; <math>MGi_1 = 0, MG_i2 = 0,</math> <math>MGi_3 = 0</math></p>
<p><b>Gramática Descritiva D</b></p> <p>Tipo de Gramática: Descritiva</p> <p>Categoria: Contexto Legal Contexto Ambiental Programa Espaço Interior</p>	<p># cl1.1 # cl1.2 # cl2.1 # cl2.2 # cl3.1 # cl3.2 # cl4.1 # cl4.2 # cl5.1 # cl5.2 # cl6.1 # cl6.2 # cl7.1 # cl7.2 # cl8 # cl9.1 # cl9.2 # cl10.1 # cl10.2 # cl11 # ca1.1 # ca1.2 # ca2 # ca3 # ca4 # ca5 # p1 # p2 # p3.1 # p3.2 # eic1 # eic2 # eic3 # eic4 # eic5 # eic6.1 # eic6.2 # eic6.3 # eic6.4 # eip1 # eip2.1 # eip2.2 # eip2.3 # eip2.4 # eip2.5 # eip3.1 # eip3.2 # eip3.3 # eip3.4 # eip3.5</p>	

Figura A5.31 : Regra 24 da Gramática do Envelope de Edifícios

## Anexo A5.32

**Regra 25:** Fecha a gramática dos operadores e devolve a forma do envelope do edifício com as superfícies divididas. Ver Figuras A5.32 e A5.32a.

Gramáticas		Componentes
<p><b>Gramática do Envelope de Edifícios A</b></p> <p>Tipo de Gramática: Forma, Descritiva</p> <p>Álgebra &lt;formas,símbolos&gt;: &lt; <math>U_{33} V_{03}</math> &gt;</p> <p>Tipo de vista: Axonometria</p>		<p>Formas &lt; <math>I_i, i_{ii}, i'_{ii}, S_{ii}, S'_{ii}</math> &gt;                  Símbolos &lt; <math>L_i</math> &gt;                  Operadores &lt; <math>MGi_i</math> &gt;  <math>MGi_1 = 1, MG_i2 = 1,</math>  <math>MGi_3 = 1</math> (ativa a Visualização das Formas)</p>
<p><b>Gramática do Lote L</b></p> <p>Tipo de Gramática: Forma</p> <p>Álgebra &lt;formas,símbolos&gt;: &lt; <math>U_{23} V_{03}</math> &gt;</p> <p>Tipo de vista: Axonometria</p>		<p>Formas &lt; <math>I_i, i_{ii}, S_{ii}</math> &gt;                  Operadores &lt; <math>MGi_i</math> &gt;  <math>MGi_1 = 1</math> (ativa a Visualização das Formas)</p>
<p><b>Gramática do Edifício E</b></p> <p>Tipo de Gramática: Forma</p> <p>Álgebra &lt;formas,símbolos&gt;: &lt; <math>U_{33} V_{03}</math> &gt;</p> <p>Tipo de vista: Axonometria</p>		<p>Formas &lt; <math>I_i, i_{ii}, S_{ii}</math> &gt;                  Símbolos &lt; <math>L_i</math> &gt;                  Operadores &lt; <math>MGi_i</math> &gt;  <math>MGi_2 = 1</math> (ativa a Visualização das Formas)</p>
<p><b>Gramática das Superfícies T</b></p> <p>Tipo de Gramática: Forma</p> <p>Álgebra &lt;formas,símbolos&gt;: &lt; <math>U_{23} V_{03}</math> &gt;</p> <p>Tipo de vista: Axonometria</p>		<p>Formas &lt; <math>I_i, i_{ii}, i'_{ii}, S_{ii}, S'_{ii}, P_{ii}</math> &gt;                  Símbolos &lt; <math>L_i</math> &gt;                  Operadores &lt; <math>MGi_i</math> &gt;  <math>MGi_3 = 1</math>                  (ativa a Visualização das Formas)                  Dimensões                  &lt; <math>a_{ii}, a'_{ii}, b_{ii}, c_{ii}</math> &gt;  <math>i \in \mathbb{N}^*</math>, <math>a_{ii}, a'_{ii}, b_{ii}, c_{ii} \in \mathbb{R}</math></p>

Figura A5.32 : Regra 25 da Gramática do Envelope de Edifícios (parte 1)

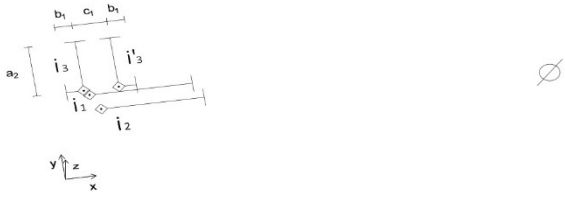
<p><b>Gramática dos Operadores M</b></p> <p>Tipo de Gramática: Forma</p> <p>Álgebra &lt;formas,símbolos&gt;: &lt; <math>U_{13} V_{03}</math> &gt;</p> <p>Tipo de vista: Axonometria</p> <p><b>Gramática Descritiva D</b></p> <p>Tipo de Gramática: Descritiva</p> <p>Categoria: Contexto Legal Contexto Ambiental Programa Espaço Interior</p>	 <p># cl1.1 # cl1.2 # cl2.1 # cl2.2 # cl3.1 # cl3.2 # cl4.1 # cl4.2 # cl5.1 # cl5.2 # cl6.1 # cl6.2 # cl7.1 # cl7.2 # cl8 # cl9.1 # cl9.2 # cl10.1 # cl10.2 # cl11 # ca1.1 # ca1.2 # ca2 # ca3 # ca4 # ca5 # p1 # p2 # p3.1 # p3.2 # eic1 # eic2 # eic3 # eic4 # eic5 # eic6.1 # eic6.2 # eic6.3 # eic6.4 # eip1 # eip2.1 # eip2.2 # eip2.3 # eip2.4 # eip2.5 # eip3.1 # eip3.2 # eip3.3 # eip3.4 # eip3.5</p>	<p>Formas &lt; <math>i_i, i'_i</math> &gt; Símbolos &lt; <math>L_i</math> &gt; Operadores &lt; <math>M_i, MGi_i</math> &gt; <math>MGi_1 = 1, MGi_2 = 1,</math> <math>MGi_3 = 1</math> (ativa a Visualização de Formas) Dimensões &lt; <math>a_i, b_i, c_i</math> &gt; <math>i \in \mathbb{N}^*, a_i, b_i, c_i \in \mathbb{R}</math></p>
--	--	---

Figura A5.32a : Regra 25 da Gramática do Envelope de Edifícios (parte 2)

## **Anexos do Capítulo 7**



## Anexo A7.1

A Tabela A7.1 apresenta os valores referentes ao contexto definido para a moradia de tipologia T2 (a tipologia T2 é considerada uma tipologia de dimensão mínima para o lote urbano em questão). Contudo, a Tabela A7.1 contém uma diferença relativamente à Tabela 5.1 apresentada no Capítulo 5: o campo “SÍMBOLO” referente às “VARIÁVEIS” foi substituído pelo campo “VALOR”, de modo a que a tabela contenha valores concretos referentes às variáveis. Por exemplo, para a variável Índice de Permeabilidade permitido o valor é de 0.3. Os valores em questão foram obtidos através da regulamentação em vigor para a localização do lote da moradia, nomeadamente o Plano Diretor Municipal de Lisboa (PDM de Lisboa de 2011), bem como através de valores escolhidos pelo projetista, neste caso o autor da tese, para preencher as variáveis e parâmetros do contexto que não são de âmbito regulamentar.

CARACTERÍSTICAS	VARIÁVEIS			TIPOS DE VARIÁVEIS	VALORES ALFANUMÉRICOS /FORMAIS
	NOME		VALOR		
Contexto Legal	Índice de permeabilidade	permitido	0.3	<float>	[0,1]
		projetado	---		
	Índice de edificabilidade	permitido	0.7	<float>	[0,1]
		projetado	---		
	Altura (metros)	permitido	7	<float>	[0, r], r ∈ R
		projetado	---		
	Número de pisos	permitido	2	<int>	[0, n], n ∈ N
		projetado	---		
	Área de implantação (m <sup>2</sup> )	permitido	255	<float>	[0, r], r ∈ R
		projetado	---		
	Área bruta de construção (m <sup>2</sup> )	permitido	510	<float>	[0, r], r ∈ R
		projetado	---		
	Área útil total (m <sup>2</sup> )	permitido	459	<float>	[0, r], r ∈ R
		projetado	---		
	Constrangimentos de implantação	Alinhamento com o plano marginal do edificado		---	<guid>
Máxima profundidade de empena (m)			15	<float>	[0, r], r ∈ R
			---	<guid>	$l_1 \in \text{Lot Grammar L}$
Outros constrangimentos			---	<float>	[0, r], r ∈ R
		---	<guid>	$l_1 \in \text{Lot Grammar L}$	
	Área de edificação (m <sup>2</sup> )		---	<float>	[0, r], r ∈ R
	Outros		---	?	?
Contexto Ambiental	Irradiação Incidente (kWh/m <sup>2</sup> )	pretendida por m <sup>2</sup>	1000	<int>	[0, n], n ∈ N
		projetada por m <sup>2</sup>	---		
		total	---	<int>	[0, n], n ∈ N

	Temperatura (°C)		---	<float>	$[-n, n], n \in \mathbb{N}$
	Iluminação (lux)		---	<int>	$[0, n], n \in \mathbb{N}$
	Nível Sonoro (dB)		---	<int>	$[0, n], n \in \mathbb{N}$
	Outros		---	?	?
Programa	Tipologia	Identificação	T2	<str>	$[T0, T1, T2, T3, T4, T5]$
		Área (m <sup>2</sup> )	---	<float>	$[0, n], n \in \mathbb{N}$
	Desempenho energético	pretendido	---	<int>	$[-n, n], n \in \mathbb{N}$
		projetado	---	<int>	$[-n, n], n \in \mathbb{N}$
Outros		---	?	?	
Espaço Interior	Espaços de Circulação	Área total	---	<float>	$[0, r], r \in \mathbb{R}$
		Altura total	---	<float>	$[0, r], r \in \mathbb{R}$
		Volume total	---	<float>	$[0, r], r \in \mathbb{R}$
		Forma geral	---	<guid>	EC1
		Numero de Pisos	1	<int>	$[0, n], n \in \mathbb{N}$
		Área Piso i	---	<float>	$[0, r], r \in \mathbb{R}$
		Pé-direito Piso i	---	<float>	$[0, r], r \in \mathbb{R}$
		Volume Piso i	---	<float>	$[0, r], r \in \mathbb{R}$
		Forma Piso i	---	<guid>	EC2
		Outros	---	?	?
	Espaços de Permanência	Numero	7	<int>	$[0, n], n \in \mathbb{N}$
		Função 1	Sala	<str>	[Quarto, Sala, Cozinha, Casa de Banho, Despensa, Outro]
		Área 1 (m <sup>2</sup> )	26	<float>	$[0, r], r \in \mathbb{R}$
		Pé-direito Espaço 1	---	<float>	$[0, r], r \in \mathbb{R}$
		Volume 1	---	<float>	$[0, r], r \in \mathbb{R}$
		Forma 1	---	<guid>	EP1
		Função 2	Cozinha	<str>	[Quarto, Sala, Cozinha, Casa de Banho, Despensa, Outro]
		Área 2 (m <sup>2</sup> )	13,8	<float>	$[0, r], r \in \mathbb{R}$
		Pé-direito Espaço 2	---	<float>	$[0, r], r \in \mathbb{R}$
		Volume 2	---	<float>	$[0, r], r \in \mathbb{R}$
		Forma 2	---	<guid>	EP2
		Função 3	Casa de Banho 1	<str>	[Quarto, Sala, Cozinha, Casa de Banho, Despensa, Outro]
		Área 3 (m <sup>2</sup> )	4,6	<float>	$[0, r], r \in \mathbb{R}$
		Pé-direito Espaço 3	---	<float>	$[0, r], r \in \mathbb{R}$
		Volume 3	---	<float>	$[0, r], r \in \mathbb{R}$
		Forma 3	---	<guid>	EP3
		Outros	---	?	?
		Função 4	Casa de Banho 2	<str>	[Quarto, Sala, Cozinha, Casa de Banho, Despensa, Outro]
Área 4 (m <sup>2</sup> )	4,3	<float>	$[0, r], r \in \mathbb{R}$		
Pé-direito Espaço 4	---	<float>	$[0, r], r \in \mathbb{R}$		
Volume 4	---	<float>	$[0, r], r \in \mathbb{R}$		

		Forma 4	---	<guid>	EP4
		Outros	---	?	?
		Função 5	Arrumos	<str>	[Quarto, Sala, Cozinha, Casa de Banho, Despensa, Outro]
		Área 5 (m <sup>2</sup> )	4,1	<float>	[0, r], r ∈ R
		Pé-direito Espaço 5	---	<float>	[0, r], r ∈ R
		Volume 5	---	<float>	[0, r], r ∈ R
		Forma 5	---	<guid>	EP5
		Outros	---	?	?
		Função 6	Quarto 1	<str>	[Quarto, Sala, Cozinha, Casa de Banho, Despensa, Outro]
		Área 6 (m <sup>2</sup> )	13,8	<float>	[0, r], r ∈ R
		Pé-direito Espaço 6	---	<float>	[0, r], r ∈ R
		Volume 6	---	<float>	[0, r], r ∈ R
		Forma 6	---	<guid>	EP6
		Outros	---	?	?
		Função 7	Quarto 2	<str>	[Quarto, Sala, Cozinha, Casa de Banho, Despensa, Outro]
		Área 7 (m <sup>2</sup> )	15,64	<float>	[0, r], r ∈ R
		Pé-direito Espaço 7	---	<float>	[0, r], r ∈ R
		Volume 7	---	<float>	[0, r], r ∈ R
		Forma 7	---	<guid>	EP7
		Outros	---	?	?
	Consumo Energético		---	<int>	[0, n], n ∈ N

Tabela A7.1 : Tabela com o contexto para o projeto da moradia de tipologia T2

## Anexo A7.2

A Tabela A7.2 apresenta os valores que foram definidos para o contexto da moradia de tipologia T5 (considerada como uma tipologia de dimensão máxima para o lote urbano em questão).

CARACTERÍSTICAS	VARIÁVEIS			TIPOS DE VARIÁVEIS	VALORES ALFANUMÉRICOS /FORMAIS
	NOME		VALOR		
Contexto Legal	Índice de permeabilidade	permitido	0.3	<float>	[0,1]
		projetado	---		
	Índice de edificabilidade	permitido	0.7	<float>	[0,1]
		projetado	---		
	Altura (metros)	permitido	7	<float>	[0, r], r ∈ R
		projetado	---		
	Número de pisos	permitido	2	<int>	[0, n], n ∈ N
		projetado	---		
	Área de implantação (m <sup>2</sup> )	permitido	255	<float>	[0, r], r ∈ R
		projetado	---		
	Área bruta de construção (m <sup>2</sup> )	permitido	510	<float>	[0, r], r ∈ R
		projetado	---		
	Área útil total (m <sup>2</sup> )	permitido	459	<float>	[0, r], r ∈ R
		projetado	---		
	Constrangimentos de implantação	Alinhamento com o plano marginal do edificado		---	<guid>
Máxima profundidade de empena			15	<float>	[0, r], r ∈ R
				---	<guid>
Outros constrangimentos				---	<float>
			---	<guid>	$l_1 \in \text{Lot Grammar L}$
	Área de edificação (m <sup>2</sup> )		---	<float>	[0, r], r ∈ R
	Outros		---	?	?
Contexto Ambiental	Irradiação Incidente (kWh/m <sup>2</sup> )	pretendida por m <sup>2</sup>	1000	<int>	[0, n], n ∈ N
		projetada por m <sup>2</sup>	---		
		total	---		
	Temperatura (°C)		---	<float>	[-n, n], n ∈ N
	Iluminação (lux)		---	<int>	[0, n], n ∈ N
	Nível Sonoro (dB)		---	<int>	[0, n], n ∈ N
	Outros		---	?	?
Programa	Tipologia	Identificação	T5	<str>	[T0, T1, T2, T3, T4, T5]

		Área (m <sup>2</sup> )	---	<float>	[0, n], n ∈ N
	Desempenho energético	pretendido	---	<int>	[-n, n], n ∈ N
		projetado	---	<int>	[-n, n], n ∈ N
	Outros		---	?	?
Espaço Interior	Espaços de Circulação	Área total	---	<float>	[0, r], r ∈ R
		Altura total	---	<float>	[0, r], r ∈ R
		Volume total	---	<float>	[0, r], r ∈ R
		Forma geral	---	<guid>	EC1
		Numero de Pisos	1	<int>	[0, n], n ∈ N
		Área Piso i	---	<float>	[0, r], r ∈ R
		Pé-direito Piso i	---	<float>	[0, r], r ∈ R
		Volume Piso i	---	<float>	[0, r], r ∈ R
		Forma Piso i	---	<guid>	EC2
		Outros	---	?	?
	Espaços de Permanência	Numero	12	<int>	[0, n], n ∈ N
		Função 1	Sala	<str>	[Quarto, Sala, Cozinha, Casa de Banho, Despensa, Outro]
		Área 1 (m <sup>2</sup> )	26	<float>	[0, r], r ∈ R
		Pé-direito Espaço 1	---	<float>	[0, r], r ∈ R
		Volume 1	---	<float>	[0, r], r ∈ R
		Forma 1	---	<guid>	EP1
		Função 2	Cozinha	<str>	[Quarto, Sala, Cozinha, Casa de Banho, Despensa, Outro]
		Área 2 (m <sup>2</sup> )	13,8	<float>	[0, r], r ∈ R
		Pé-direito Espaço 2	---	<float>	[0, r], r ∈ R
		Volume 2	---	<float>	[0, r], r ∈ R
		Forma 2	---	<guid>	EP2
		Função 3	Casa de Banho 1	<str>	[Quarto, Sala, Cozinha, Casa de Banho, Despensa, Outro]
		Área 3 (m <sup>2</sup> )	4,6	<float>	[0, r], r ∈ R
		Pé-direito Espaço 3	---	<float>	[0, r], r ∈ R
		Volume 3	---	<float>	[0, r], r ∈ R
		Forma 3	---	<guid>	EP3
		Outros	---	?	?
		Função 4	Casa de Banho 2	<str>	[Quarto, Sala, Cozinha, Casa de Banho, Despensa, Outro]
		Área 4 (m <sup>2</sup> )	4,3	<float>	[0, r], r ∈ R
		Pé-direito Espaço 4	---	<float>	[0, r], r ∈ R
		Volume 4	---	<float>	[0, r], r ∈ R
		Forma 4	---	<guid>	EP4
		Outros	---	?	?
Função 5		Arrumos	<str>	[Quarto, Sala, Cozinha, Casa de Banho, Despensa, Outro]	
Área 5 (m <sup>2</sup> )		4,1	<float>	[0, r], r ∈ R	
Pé-direito Espaço 5	---	<float>	[0, r], r ∈ R		
Volume 5	---	<float>	[0, r], r ∈ R		
Forma 5	---	<guid>	EP5		
Outros	---	?	?		

		Função 6	Quarto 1	<str>	[Quarto, Sala, Cozinha, Casa de Banho, Despensa, Outro]
		Área 6 (m <sup>2</sup> )	15,64	<float>	[0, r], r ∈ R
		Pé-direito Espaço 6	---	<float>	[0, r], r ∈ R
		Volume 6	---	<float>	[0, r], r ∈ R
		Forma 6	---	<guid>	EP6
		Outros	---	?	?
		Função 7	Quarto 2	<str>	[Quarto, Sala, Cozinha, Casa de Banho, Despensa, Outro]
		Área 7 (m <sup>2</sup> )	17	<float>	[0, r], r ∈ R
		Pé-direito Espaço 7	---	<float>	[0, r], r ∈ R
		Volume 7	---	<float>	[0, r], r ∈ R
		Forma 7	---	<guid>	EP7
		Outros	---	?	?
		Função 8	Escritório	<str>	[Quarto, Sala, Cozinha, Casa de Banho, Despensa, Outro]
		Área 8 (m <sup>2</sup> )	13,8	<float>	[0, r], r ∈ R
		Pé-direito Espaço 8	---	<float>	[0, r], r ∈ R
		Volume 8	---	<float>	[0, r], r ∈ R
		Forma 8	---	<guid>	EP8
		Outros	---	?	?
		Função 9	Casa de Banho Piso 1	<str>	[Quarto, Sala, Cozinha, Casa de Banho, Despensa, Outro]
		Área 9 (m <sup>2</sup> )	4,3	<float>	[0, r], r ∈ R
		Pé-direito Espaço 9	---	<float>	[0, r], r ∈ R
		Volume 9	---	<float>	[0, r], r ∈ R
		Forma 9	---	<guid>	EP9
		Outros	---	?	?
		Função 10	Quarto 3	<str>	[Quarto, Sala, Cozinha, Casa de Banho, Despensa, Outro]
		Área 10 (m <sup>2</sup> )	13,8	<float>	[0, r], r ∈ R
		Pé-direito Espaço 10	---	<float>	[0, r], r ∈ R
		Volume 10	---	<float>	[0, r], r ∈ R
		Forma 10	---	<guid>	EP10
		Outros	---	?	?
		Função 11	Quarto 4	<str>	[Quarto, Sala, Cozinha, Casa de Banho, Despensa, Outro]
		Área 11 (m <sup>2</sup> )	15,64	<float>	[0, r], r ∈ R
		Pé-direito Espaço 11	---	<float>	[0, r], r ∈ R
		Volume 11	---	<float>	[0, r], r ∈ R
		Forma 11	---	<guid>	EP11
		Outros	---	?	?
		Função 12	Quarto 5	<str>	[Quarto, Sala, Cozinha, Casa de Banho, Despensa, Outro]
		Área 12 (m <sup>2</sup> )	17	<float>	[0, r], r ∈ R
		Pé-direito Espaço 12	---	<float>	[0, r], r ∈ R
		Volume 12	---	<float>	[0, r], r ∈ R
		Forma 12	---	<guid>	EP12
		Outros	---	?	?

	Consumo Energético	---	<int>	[0, n], n ∈ N
--	--------------------	-----	-------	---------------

Tabela A7.2 : Tabela com o contexto para o projeto da moradia de tipologia T5



## **Publicações Científicas**



## Lista de Publicações Científicas:

**Mateus, Daniel, and José Pinto Duarte.** 2016. "A grammar-based system for building envelope design to maximize PV performance". In *11th Conference on Advanced Building Skins 10-11 October 2016*, edited by Advanced Building Skins GmbH, 19-27. Bern, Switzerland.

**Mateus, Daniel, José Pinto Duarte, and Vítor Leal.** 2015. "Towards a grammar-based system for the design of building envelopes that maximize the capture of solar energy". In *10th Conference on Advanced Building Skins 3-4 November 2015*, edited by EF ECONOMIC FORUM, 52-61. Bern, Switzerland.

**Mateus, Daniel, Maurício Sousa, Rui de Klerk, Sandra Gama, Joaquim Jorge, and José Pinto Duarte.** 2015. "From Tecton to Technos: going back to the classical roots of Architecture using virtual reality". In *Real Time Extending the Reach of Computation – Proceedings of the 33th eCAADe Conference, 16-18 September, 2015*, edited by Bob Martens et al., 107-116. TU Wien, Austria.

**Mateus, Daniel, Eduardo Castro e Costa, José Pinto Duarte, and Joaquim Jorge.** 2014. "Tecton 3D – Simulacros Digitais: Modelando a Terceira Dimensão. Análise de Softwares de Modelação 3D". In *Arquitecturas do Mar, da Terra e do Ar – Arquitectura e Urbanismo na Geografia e na Cultura, 2014*, edited by AEAULP, 383-390. Lisboa, Portugal.





ADVANCED  
BUILDING SKINS

10-11 October 2016, Bern, Switzerland

# Advanced Building Skins



## **11th Conference on Advanced Building Skins**

10-11 October 2016, Bern, Switzerland

ISBN: 978-3-98120539-8

Advanced Building Skins GmbH  
Hostettstr. 30  
CH-6062 Wilen (Sarnen)  
Switzerland

VAT: CHE-383.284.931

Tel: +41 41 508 7036  
info@abs.green

© Copyright: Advanced Building Skins GmbH

# A grammar-based system for building envelope design to maximize PV performance

Daniel Mateus <sup>1</sup>, José Pinto Duarte <sup>2</sup>

<sup>1</sup> CIAUD, Faculty of Architecture, University of Lisbon, Lisbon, Portugal

<sup>2</sup> SCDC, Stuckeman School of Architecture and Landscape Architecture, Penn State University, Pennsylvania, USA

<sup>1</sup> [dmateus@fa.ulisboa.pt](mailto:dmateus@fa.ulisboa.pt), <sup>2</sup> [jpx400@psu.edu](mailto:jpx400@psu.edu)

## Abstract

This article explores the application of photovoltaic technology on the outer envelope (roof and facade) of buildings, thereby decentralizing and diversifying places where energy is produced. The article builds on previous work concerned with the development of a methodology for designing the shape of the outer envelope of the buildings that optimizes the amount of electricity they generate. Accordingly, it is developed a computational design system that works by applying a shape grammar, which enables the automatic generation of shapes. Based on the geographic location of the building and its initial shape as defined by the architect, the computer system suggests shapes for the envelope that optimize solar exposure and, therefore, their capacity to generate electricity. In brief, the shape grammar works as follows: to an initial shape drawn by the architect, shape transformation rules are applied recursively to optimize the solar exposure of the envelope. It is described how the initial shape can be defined, as well as a set of transformation rules, and then illustrated how the grammar works through a series of examples. The goal is to implement the grammar in software that supports architects in the early stages of design of the envelope shape of buildings.

Keywords: Buildings Envelopes Design, Solar Exposure, Computational Design System, Shape Grammars, Optimization, Software.

## Introduction

The present article addresses the theme of energy generation on the outer envelope of buildings, including roof and facades, by converting sun rays through photovoltaic technology. Traditionally, supplying energy to cities requires large devices outside cities to capture the energy from a natural source and a complex infrastructure network to transport the captured energy to the city, where it is needed. Both the factories and the infrastructure have a significant presence in the landscape and imply other negative environmental impacts. This article builds on previous research [1] that seeks an alternative approach, in which the goal is to produce energy within the city. The idea is to increase or optimize the amount of electric energy generated in the outer envelope of buildings and the research is focused on how to design the shape of the outer envelope of buildings for that purpose. In that sense, we are proceeding to the development of a design methodology resorting to a Shape Grammar. This grammar has the ability to transform the shapes designed by architects in the conceptual phase of architectural projects in more efficient shapes from the point of view of electricity generation in the outer envelope of buildings. Once the grammar is implemented into a computer program, it can serve as a design tool to assist architects during the initial phase of the design process.

The shapes suggested by the grammar-based tool constitute a reference for the designer seeking to find an appropriate shape for the outer envelope of buildings. The designer may then interact with the computer program in the course of the design process, changing the suggested shapes according to other criteria considered relevant, including objective goals such as structural performance, or subjective ones like aesthetics. The article describes the development of the shape grammar, namely the grammar features, how the initial shape can be defined, the transformation rules that can be applied, and illustrates how the grammar works through an example of application. The solutions generated by applying the grammar are analysed according to their potential for generating electricity, and the results are discussed. The article concludes by outlining future research planned for the development of the shape grammar.

## Shape Grammar

It is intended that the developed shape grammar can be applied to any type of building, as well as to any shape. However, to simplify the problem, it was decided at this stage to consider only the buildings for collective housing, with parallelepiped shapes. In a next stage, the intention is to expand the capacity of the grammar for more types of buildings as well as for more complex shapes. The grammar developed to date can be designated as "Grammar for Outer Envelopes of Parallelepiped Buildings" and is characterized by being a compound grammar (Set Grammar), composed by parametric parallel grammars, as shown in Scheme 1.

			STAGES				
			A Set the Initial Shape (I)	B Set the orientation of the building envelope	C Set the building envelope shape	D Set the energy generation areas	E Set the openings of the building envelope
GRAMMARS	Set Grammar	W: $\langle U_{33} V_{03} \rangle$	X	X	X	X	X
	Lot Grammar	L: $\langle U_{33} V_{03} \rangle$	X				
	Building Envelope Grammar	E: $\langle U_{33} V_{03} \rangle$	X	X	X	X	X
	Surfaces Grammar	S: $\langle U_{33} V_{03} \rangle$			X	X	X
	Photovoltaic Elements Grammar	F: $\langle U_{33} V_{03} \rangle$			X	X	X
	Labels Grammar	M: $\langle U_{33} V_{03} \rangle$		X	X	X	X

Scheme 1: Functional scheme of the Set Grammar

The grammar has five stages:

- Stage A: Set the Initial Shape (I);
- Stage B: Set the orientation of the building envelope;
- Stage C: Set the building envelope shape;
- Stage D: Set the energy generation areas;
- Stage E: Set the openings of the building envelope.

And is composed by the following parametric parallel grammars:

- General Grammar W:  $\langle U_{33} V_{03} \rangle$ ;
- Lot Grammar L:  $\langle U_{33} V_{03} \rangle$ ;
- Building Envelope Grammar E:  $\langle U_{33} V_{03} \rangle$ ;
- Surfaces Grammar S:  $\langle U_{33} V_{03} \rangle$ ;
- Photovoltaic Elements Grammar F:  $\langle U_{33} V_{03} \rangle$ ;
- Labels Grammar M:  $\langle U_{13} V_{03} \rangle$ .

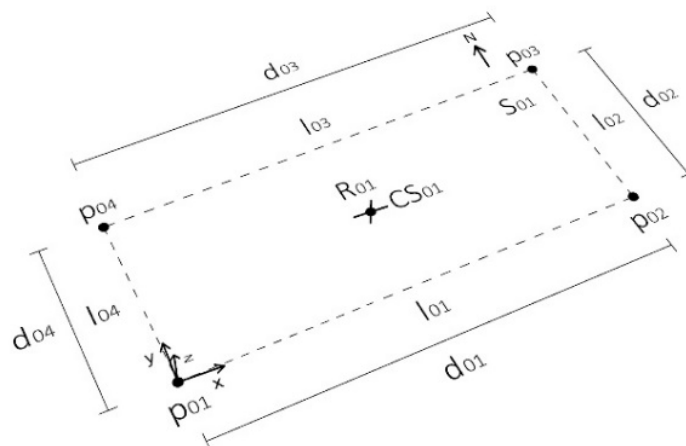
The General Grammar contains the elements of all the others grammars, showing the overall result of the grammars. The Lot Grammar contains elements relating to the lot for where the building is designed, the Building Envelope Grammar the elements relating to the outer envelope, the Surfaces Grammar that ones that refer to the surfaces of the building envelope considered individually, the Photovoltaic Elements Grammar contains the information related with the photovoltaic elements and the Labels Grammar integrates auxiliary elements, which guide the implementation of the grammar rules and allow the transition between the different grammars. The way a shape grammar works can be consulted on previous work [1], as well as in articles related with shape grammars [2]. Next, are presented some main transformation rules of the grammar developed to date.

## STAGES AND RULES OF THE SHAPE GRAMMAR FOR OUTER ENVELOPES OF PARALLELEPIPED BUILDINGS

### STAGE A – SET THE INITIAL SHAPE OF THE LOT AND OF THE BUILDING ENVELOPE

Set Grammar W:  $\langle U_{33} V_{03} \rangle$

Initial Shape – Architect sets (draws, models or inserts) the shape of the Lot



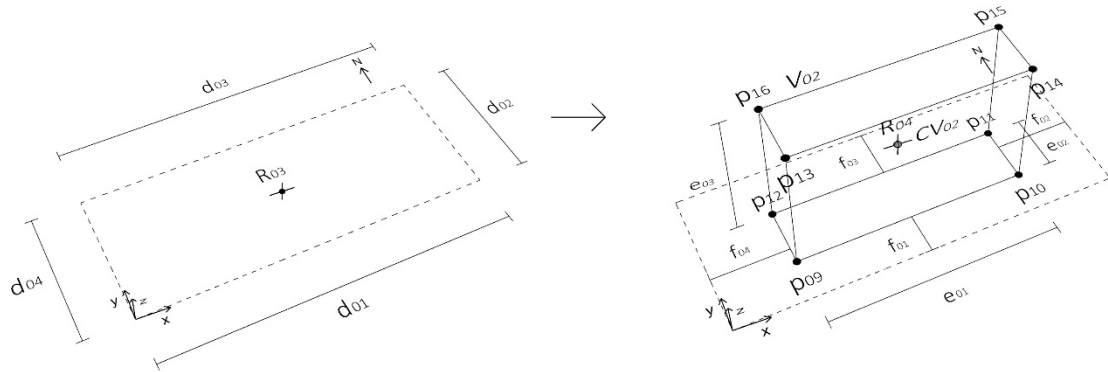
Control Conditions:

Dimensions:

in the case study,  $d_{01} = d_{03} = 110\text{m}$     $d_{02} = d_{04} = 45\text{m}$

Set Grammar W: < U33 V03 >

Rule 3 – Architect draws/models the initial shape of the building envelope in the Lot



Control Conditions:

V02 C V01

V01: Buildable volume of the Lot

V02: Volume of the building envelope

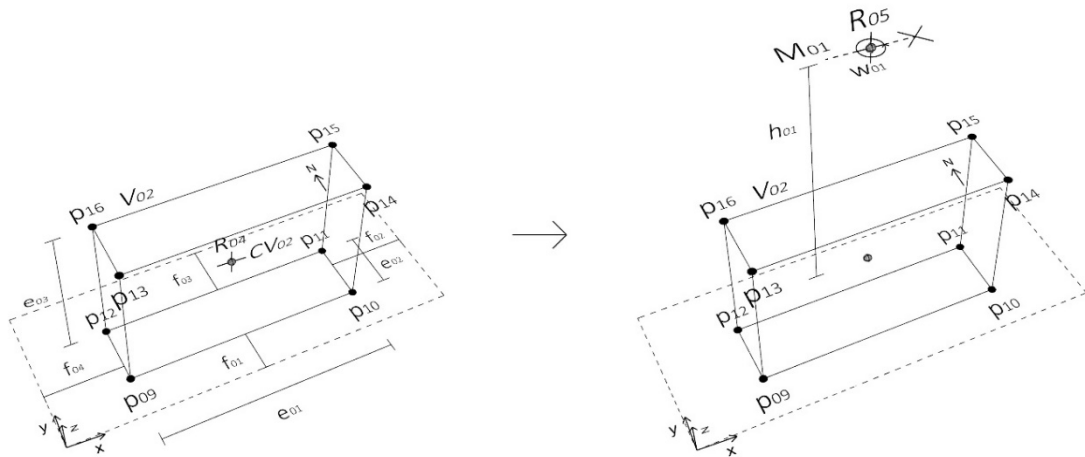
Dimensions:

in the case study, 22m e01 110m, 17m e02 45m, 14m e03 70m  
and 0m f01 f03 28m, 0m f02 f04 88m

## STAGE B – SET THE ORIENTATION OF THE BUILDING ENVELOPE

Set Grammar W: < U33 V03 >

Rule 4 – Insert rotation label (Mi)



Control Conditions:

V02 C V01

V01: Buildable volume of the Lot

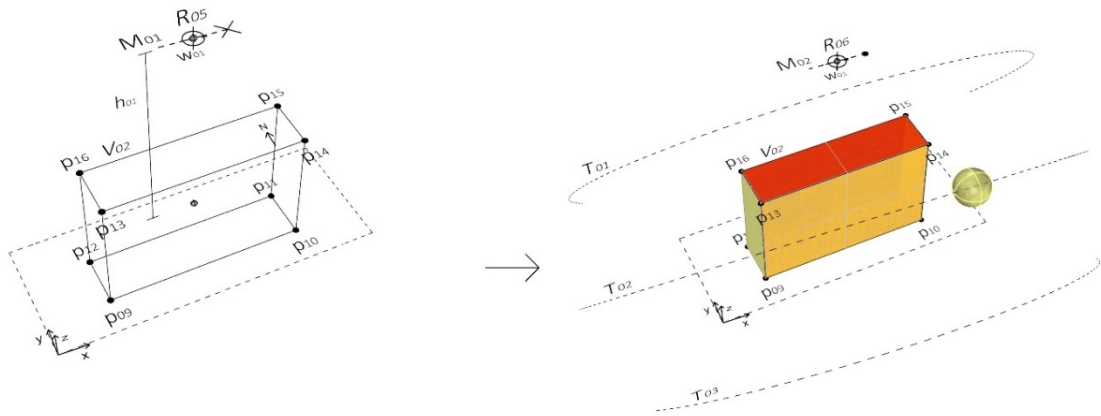
V02: Volume of the building envelope

Dimensions:

h01 = 100m

Set Grammar W: < U33 V03 >

Rule 5 – Insert paths of the sun ( $T_i$ ) and evaluate incident radiation



Control Conditions:

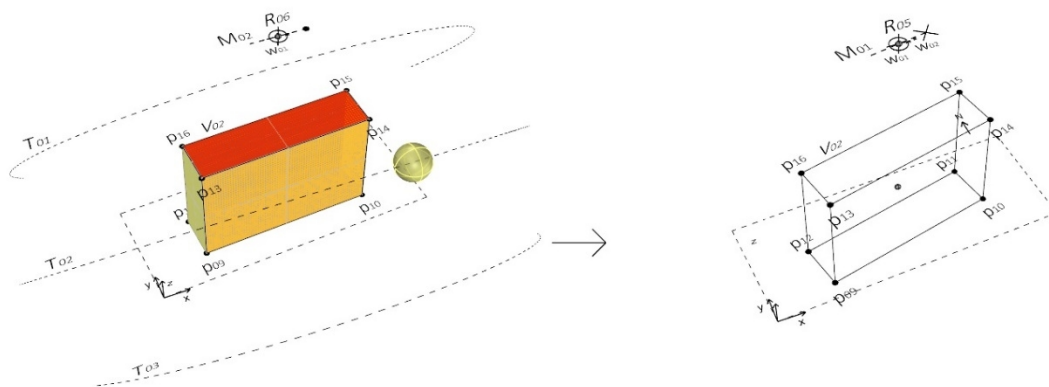
V02 C V01

V01: Buildable volume of the Lot

V02: Volume of the building envelope

Set Grammar W: < U33 V03 >

Rule 6 – Rotation of the building envelope



Control Conditions:

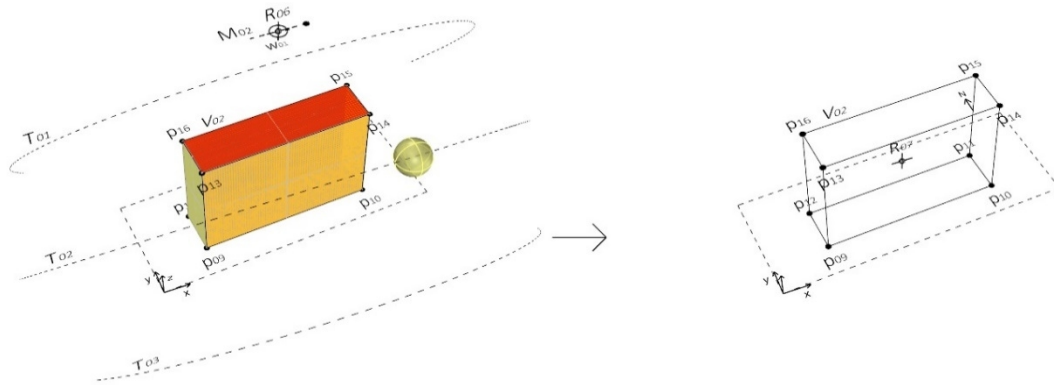
V02 C V01

V01: Buildable volume of the Lot

V02: Volume of the building envelope

Set Grammar W: < U33 V03 >

Rule 7 – Elimination of the rotation label and choice of the best orientation



Control Conditions:

V02 C V01

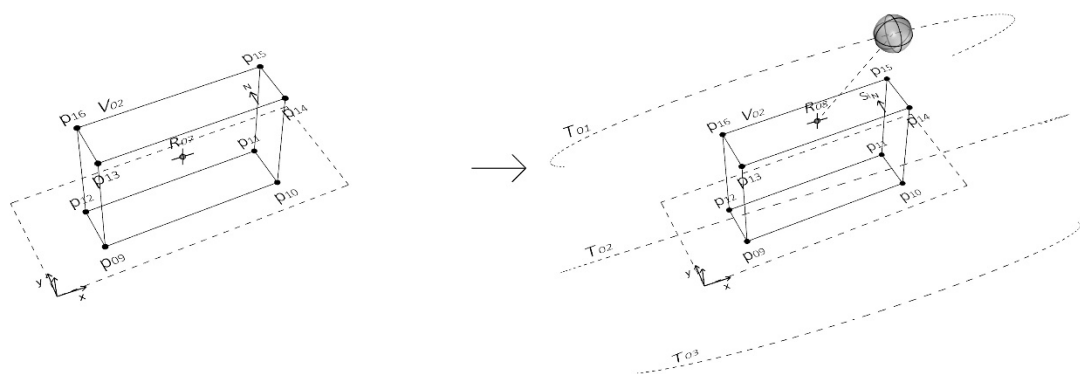
V01: Buildable volume of the Lot

V02: Volume of the building envelope

### STAGE C – SET THE SHAPE OF THE BUILDING ENVELOPE

Set Grammar W: < U33 V03 >

Rule 8 – Select surface with more incident radiation



Control Conditions:

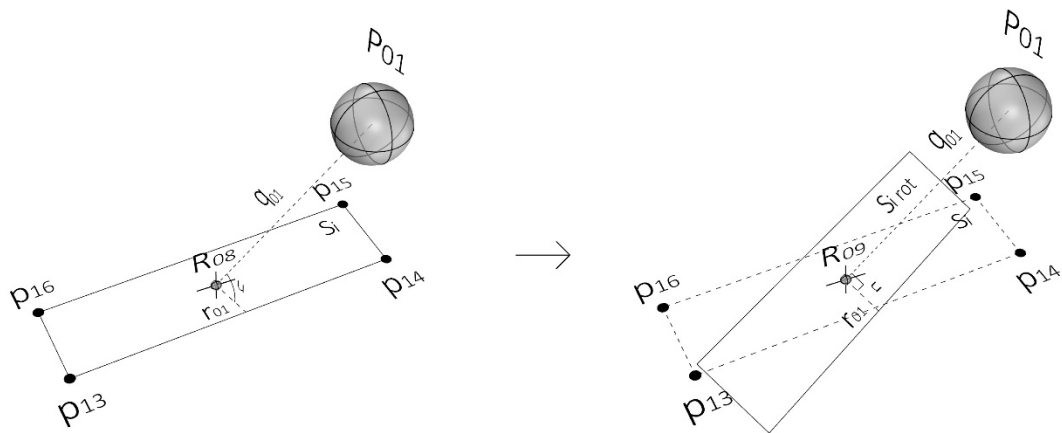
V02 C V01

V01: Buildable volume of the Lot

V02: Volume of the building envelope

Surfaces Grammar W: < U33 V03 >

Rule 9 – Make the surface perpendicular to the closest position of the sun



Control Conditions:

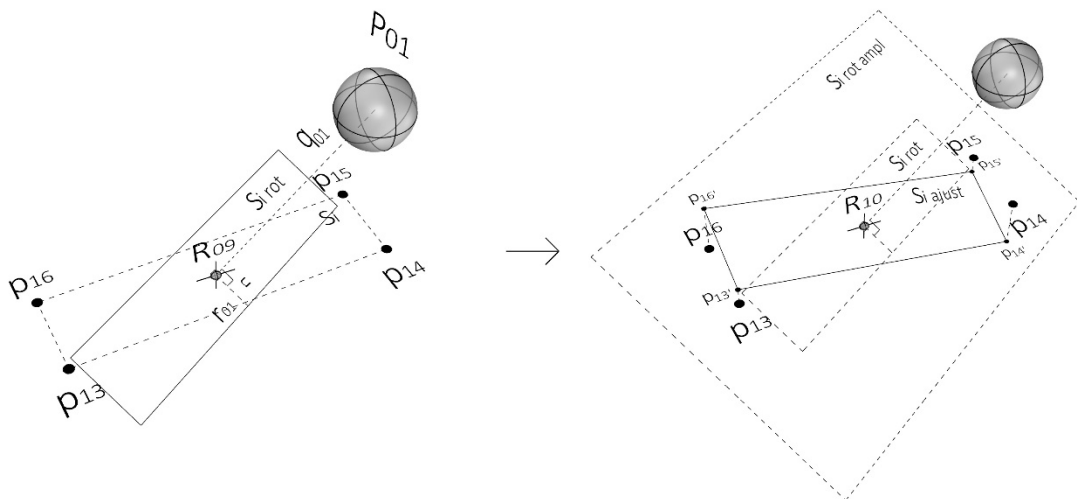
$S_i \rightarrow S_i \text{ rot}$

Dimensões:

$0^\circ \leq \alpha_i \leq 180^\circ \quad \alpha_i = 90^\circ$

Surfaces Grammar W: < U33 V03 >

Rule 10 – Adjusting the shape of the surface to the location of the volume of the building envelope



Control Conditions:

$S_i \text{ rot} \rightarrow S_i \text{ rot ampl} \rightarrow S_i \text{ ajust}$

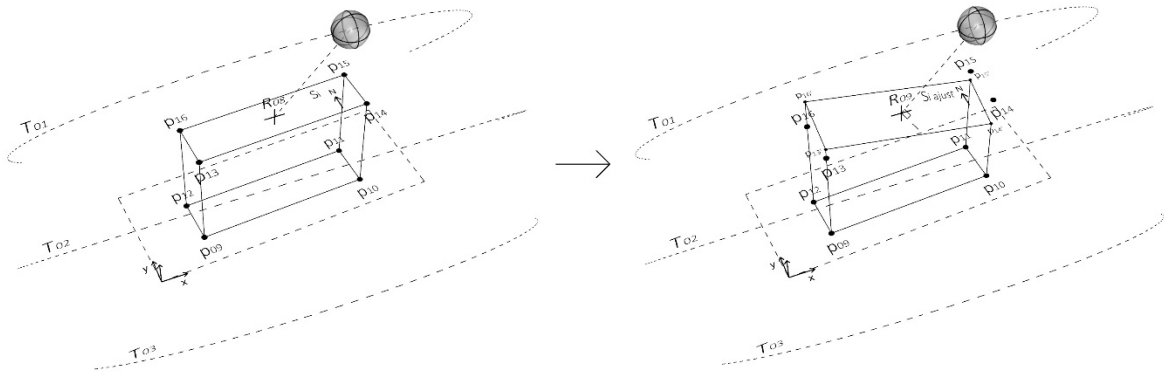
$S_i \text{ rot ampl}$ : surface  $S_i \text{ rot}$ , scaled

$p_i'$ : projection of the points  $p_i$  in the surface  $S_i \text{ rot ampl}$

$S_i \text{ ajust}$ : surface  $S_i \text{ rot}$ , adjusted

Set Grammar W:  $\langle U_{33} V_{03} \rangle$

Rule 11 – Rotate and adjust surface in the volume of the building envelope

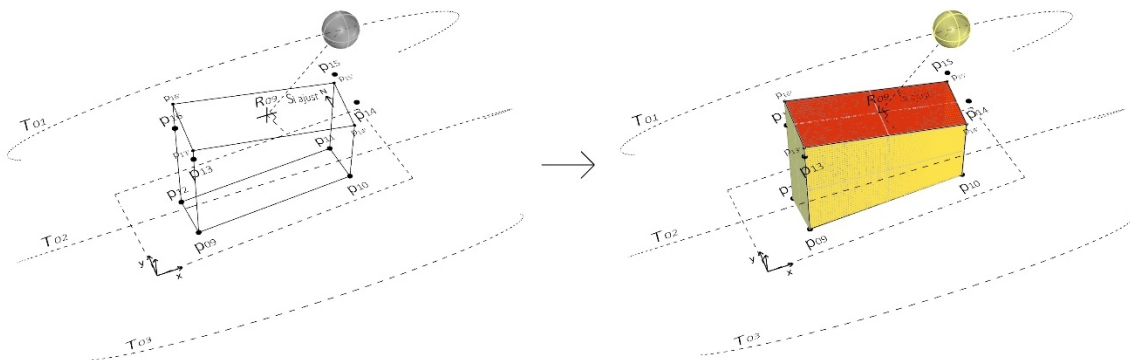


Control Conditions:

$S_i$   $S_i$  adjust

Set Grammar W:  $\langle U_{33} V_{03} \rangle$

Rule 12 – Evaluate incident radiation in the building envelope



Surfaces Grammar W:  $\langle U_{33} V_{03} \rangle$

Rule 17 – Division of one surface in two equal surfaces

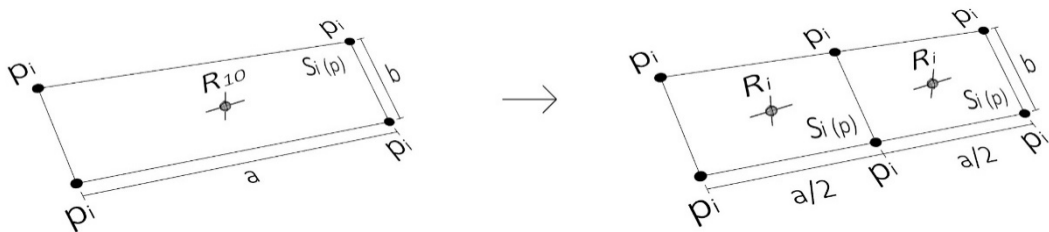


Table 1: Stages and rules of the shape grammar

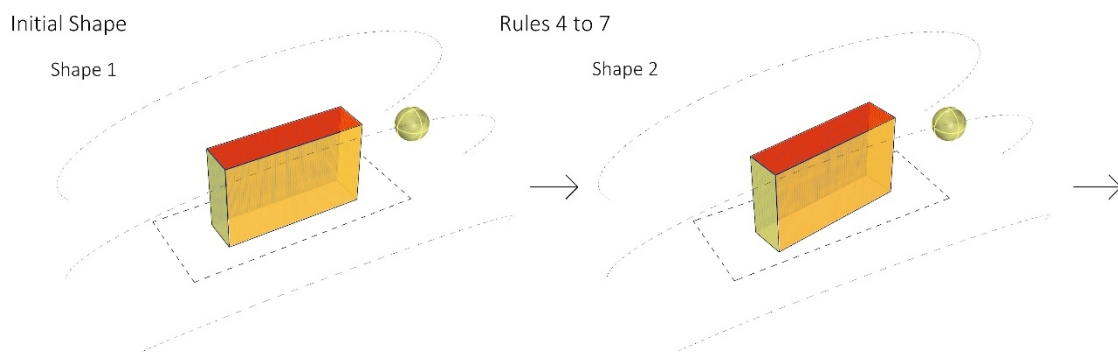
According with Table 1, in Stage A (Set the Initial Shape of the Lot and of the Building Envelope), the Initial Shape is the shape of the lot, defined by the architect. In Rule 3, the architect draws, models or inserts in the lot the initial shape of the building envelope. There are other complementary rules at this stage, but these are the main ones. After that, Stage B (Set the Orientation of the Building Envelope) begins with Rule 4, that inserts a rotation label (Mi) over the building envelope, to guide its rotation inside the limits of the lot. Rule 5 inserts the solar path, throughout the day and year, according to the geographic location of the envelope, and evaluates the incident solar radiation on it. Rule 6 rotates the building envelope, by initial definition, from ten to ten degrees. It is possible to change this value, if desired. It is ensured that are only considered the rotations of the envelope within the lot, through the control condition  $V_{02} \leq V_{01}$ , where  $V_{02}$  is the Volume of the building envelope and  $V_{01}$  is the Buildable volume of the lot. Rule 7 eliminates the rotation label, ending the rotation series, and selects the building envelope orientation with the higher value of incident radiation.

The next Stage, the C (Set the Shape of the Building Envelope), begins with Rule 8, that selects the surface of the envelope with higher value of incident radiation, that has not been yet transformed by rules. Rule 9 rotates in three dimensions the surface, making it perpendicular, from its centroid, with the nearest sun position. This increases the efficiency of the absorption of the sun rays, because their absorption by a surface is optimized when the incident angle on the surface is of ninety degrees. Rule 10 adjusts the transformed surface, so that it stays over the volume defined by the remaining surfaces of the envelope. Rule 11 is a rule of the general grammar that shows the result of rules 9 and 10, that are from the surfaces grammar, in the building envelope. Rule 12 evaluates the incident radiation in the envelope, after the application of a rotation and adjustment rule to a surface. Rule 17 divides one surface into two equal surfaces.

## Example of grammar implementation and evaluation of results

Through the implementation of the grammar, it is possible to generate various shapes for the building envelope, which are more efficient than the initial shape for the absorption of solar rays and therefore for the generation of electricity. In Figure 1 is shown the application of a possible sequence of rules, with the assessment of the incident radiation, made by the software DIVA in Rhinoceros. To the initial shape are applied Rules 4 to 7, corresponding to the rotation of the envelope and to the choice of the best orientation. Rules 8 to 12 are then applied, rotating and adjusting the surface with higher incident radiation, to increase its efficiency. Next, a sequence of Rules 8 to 12 and 17 are applied to the same surface, dividing it in four parts and rotating that parts according to positions of the sun, further increasing the efficiency of the envelope. The same sequence of Rules 8 to 12 and 17 are also applied to the surface with the second highest value of incident solar radiation.

Results are shown in Table 2. It is possible to see that the value of incident radiation per square meter in the building envelope increases as the rules are applied, since the 843,95 KWh/m<sup>2</sup> of the initial shape to the 935,79 KWh/m<sup>2</sup> of the last shape. The total value of incident radiation also increases, from the 6 690 833 KWh of the initial shape to the 7 442 270 KWh of the last shape. There is an exception, in the transformation of the shape 3 to the shape 4, where the value decreases from 7 045 478 KWh to 6 930 777 KWh, but this is due to the fact that the surface area of the envelope also decreases. With the application of a rule that changes the scale of the envelope, the total value will increase.



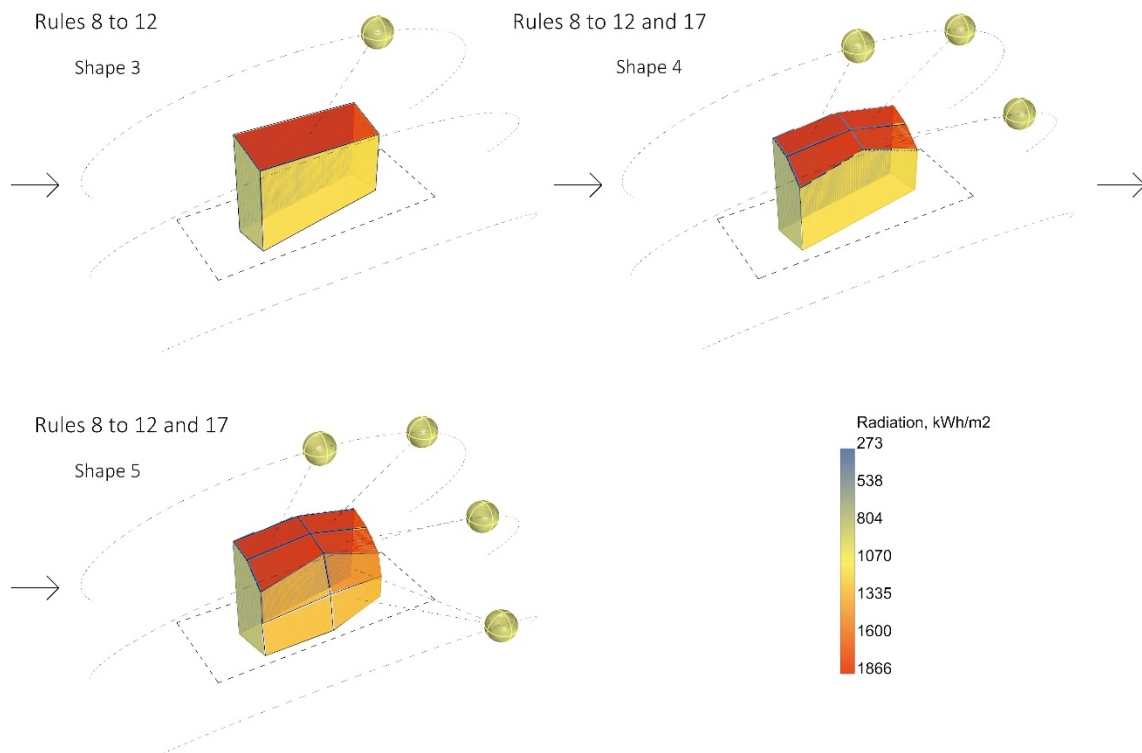


Figure 1: Application of a sequence of rules

	Shape 1	Shape 2	Shape 3	Shape 4	Shape 5
Incident radiation per m <sup>2</sup> (KWh/m <sup>2</sup> )	843,95	852,05	872,72	883,46	935,78
Total value of incident radiation (KWh)	6 690 833	6 755 067	7 045 478	6 930 777	7 442 270

Table 2: Values of incident radiation in the shapes of the building envelope

## Conclusions and future research

The results achieved in the grammar implementation prove that the developed shape grammar for outer envelopes of parallelepiped buildings is efficient as a tool for achieve higher values of incident radiation in the conceptual design of the building envelope. It has the capacity of maximize the performance of the photovoltaic elements placed in the envelope surfaces, leading to higher values of electricity generation. Future research will develop the shape grammar, its structure and rules, and will implement it in a software to be used by architects in the conceptual design of buildings.

## Acknowledgments

Daniel Mateus wish to acknowledge to the Tecton 3D Project, funded by the Portuguese Foundation for Science and Technology (FCT) with grant PTDC/EEI-SII/3154/2012, for his research grant, which allowed the research presented in this article.

## References

- D. Mateus, J.P. Duarte, V. Leal, "Towards a grammar-based system for the design of building envelopes that maximize the capture of solar energy", in *Proceedings of 10<sup>th</sup> Conference on Advanced Building Skins*, Bern, Switzerland, November 3-4 2015. ISBN 978-3-98120538-1, pp. 52-61.
- G. Stiny, "Introduction to shape and shape grammars", *Environment and Planning B: Planning and Design*, Vol. 7, 1980, pp. 343-351.



ADVANCED  
BUILDING SKINS

3-4 November 2015, Bern, Switzerland

# Advanced Building Skins



**10th Conference on Advanced Building Skins**

3-4 November 2015, Bern, Switzerland

ISBN: ISBN 978-3-98120538-1

Economic Forum  
Landsberger Str. 155  
80687 Munich, Germany

[info@economic-forum.eu](mailto:info@economic-forum.eu)

DE129771557

© Copyright: EF ECONOMIC FORUM

# Towards a grammar-based system for the design of building envelopes that maximize the capture of solar energy

Daniel Mateus <sup>1</sup>, José Pinto Duarte <sup>2</sup>, Vitor Leal <sup>3</sup>

<sup>1,2</sup> CIAUD, Faculty of Architecture, University of Lisbon, Portugal

<sup>3</sup> Institute of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering of the University of Porto, Portugal

<sup>1</sup> [dmateus@fa.ulisboa.pt](mailto:dmateus@fa.ulisboa.pt), <sup>2</sup> [jduarte@fa.ulisboa.pt](mailto:jduarte@fa.ulisboa.pt), <sup>3</sup> [vleal@fe.up.pt](mailto:vleal@fe.up.pt)

## Abstract

The generation of electricity from renewable energy sources, such as energy conversion of sun rays through photovoltaic technology, is increasingly becoming a paradigm worldwide. It makes sense, therefore, the application of photovoltaic technology on the outer envelope (roof and facade) of buildings, decentralizing and diversifying the locals of energy capture, thereby creating alternatives to the use of the public network infrastructure for electric energy supply in buildings.

It is proposed in this article a methodology for the early design phase of the shape of the outer envelope of buildings that maximize the amount of electricity they generate. It includes a shape grammar-based computational design system, composed of an initial shape representing the building envelope and a set of rules that apply recursively to generate suitable designs. The goal is to implement, in the future, the grammar into a computer program. Once the architect defines the initial shape and indicates the geographic location, computer program will suggest shapes for the outer envelope that optimize its potential to generate electricity. During the application of the rules, the architect can interact with the design system and change the suggested shapes according to objective criteria, such as structural performance, or subjective criteria, as aesthetics.

Keywords: Energy Generation Design, Building Envelope Design, Shape Grammars, Computational Design System, Optimization, Photovoltaic Technology.

## 1. Introduction

The present article addresses the theme of energy generation on the outer envelope of buildings, including roof and facades, by converting sun rays through photovoltaic technology. Traditionally, supplying energy to cities requires large devices outside cities to capture the energy from a natural source and a complex infrastructure network to transport the captured energy to the city, where it is needed. Both the factories and the infrastructure have a significant presence in the landscape and imply other negative environmental impacts. This article describes the initial step of research that seeks an alternative approach, in which the goal is to produce energy within the city. The idea is to increase or optimize the amount of electric energy generated in the outer envelope of buildings and the research is focused on how to design the shape of the outer envelope of buildings for that purpose. In that sense, we are proceeding to the development of a design methodology resorting to a Shape Grammar. This grammar has the ability to transform the shapes designed by architects in the conceptual phase of architectural projects in more efficient shapes from the point of view of electricity generation in the outer envelope of buildings. Once the grammar is implemented into a computer program, it can serve as a design tool to assist architects during the initial phase of the design process.

The shapes suggested by the grammar-based tool constitute a reference for the designer seeking to find an appropriate shape for the outer envelope of buildings. The designer may then interact with the computer program in the course of the design process, changing the suggested shapes according to other criteria considered relevant, including objective goals such as structural performance, or subjective ones like aesthetics. The paper identifies the types of buildings to which the proposed system applies and then it describes the preliminary shape grammar. The solutions generated by applying the grammar are then analysed according to their potential for generating electricity, and the results are discussed. The article concludes by outlining future research planned for the development of a more elaborated shape grammar.

## 2. Theme

The generation of electricity from renewable energy sources, such as energy conversion of sun rays through photovoltaic technology, is increasingly becoming a paradigm worldwide. Given this paradigm, it makes sense the application of photovoltaic technology on the outer envelope (roof and facade) of buildings, decentralizing and diversifying the locals for capturing energy, constituting an alternative to the use of public networks infrastructure for electric energy supply in buildings.

The relevance of the theme energy generation on the outer envelope of buildings is due to the fact that of the total energy consumption worldwide, 36% occurs in sectors that consume most of the energy they use in buildings, namely, 27% in the residential sector and 9% in the commercial sector. In the transport, industry and other sectors, energy consumption in buildings is very low. These data is diagrammed in Figure 1, which shows, for each sector, the percentage of energy consumption in the world in 2004 [1, 2].

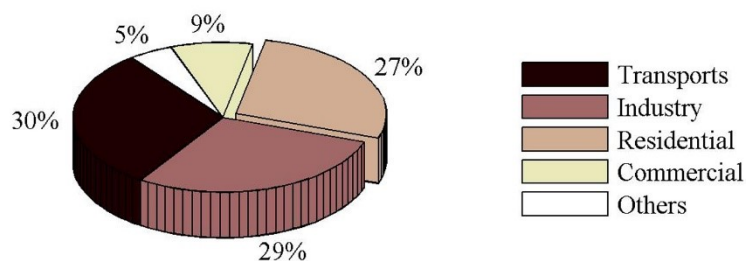


Figure 1: Percentage of the energy consumption by sector in the world

Data shows that buildings are responsible for more than one third of the energy consumption worldwide.

Taking these data into consideration, it makes sense to consider the theme of energy generation in buildings. Costs associated with raw materials and infrastructure for energy generation and transport can significantly decrease, leading to a decrease in the cost of energy to the end consumer. On the other hand, by using a renewable energy source like the sun, the application of technologies such as photovoltaics on the outer envelope of buildings contributes to the generation of energy in an environmentally sustainable way, reducing the need to resort to fossil fuels, which are increasingly scarce and have serious consequences for the climate and global environment.

### **3. Problem, Research Question and Hypothesis**

#### **3.1 Problem**

Once we accept that producing energy in the outer envelope of buildings is a desirable research goal, the problem becomes one of maximizing the quantity of electrical energy generated in this way. This implies to include the generation of electricity as a criterion in the design of the outer envelope of buildings. To accomplish this, one can follow two ways: (1) manipulating the amount and type of material employed in the outer envelope, taking into account the conversion efficiency rate of the photovoltaic materials used, and (2) manipulating the shape of the outer envelope, so as to maximize the capture of solar radiation at a given location along the day and throughout the year.

#### **3.2 Research Question**

The research question becomes finding ways to design the shape of the outer envelope of buildings that optimize the amount of electricity it generates, while allowing simultaneously the designer to take other objective and subjective criteria into account, like structural performance or aesthetics, respectively. In a formal way the research question is: "How to design the shape of the outer envelope of buildings in order to maximize the generation of electrical energy?"

#### **3.3 Hypothesis**

The hypothesis raised in the research is that it is possible to devise a shape grammar-based methodology for the design of the shape of the outer envelope of buildings that increases its potential to generate electricity. A Shape Grammar is a formal system composed of an initial shape and rules that apply recursively to that shape to generate different types of designs [3]. A Shape Grammar can be used to develop computational design systems that automate design tasks. This type of generative design system has been used in different design areas, such as architecture, engineering, urban and product design. A particularly interesting application of shape grammars was in the development of an architectural design system that allowed the generation of different single-family houses within a given style while satisfying a set of predefined criteria, such as the household profile, their design preferences, and the cost that they could afford [4].

According to the design methodology proposed in this article, the initial shape of the outer envelope of the building is first defined by the designer, then taking the building's geographic location and solar orientation in consideration, a set of rules can be applied, manually by the designer or automatically by a computer, to change the shape of the outer envelope, to improve its capacity for generating electrical energy. During the application of the rules, the designer can interact with the design system and change the shape of the building, according to other criteria he considers relevant.

### **4. A Shape Grammar for Energy Generation Building Envelope Design**

#### **4.1 Description**

This section lists the typologies of buildings to which the proposed shape grammar applies, explains how the shape grammar operates, and assesses its ability to generate designs that capture solar radiation. The preliminary components of the desired shape grammar are described, namely the initial shape and how it can be parameterized, as well as the type of rules that can be applied during the generative process. Next, the potential for electrical energy generation of each of the defined rules is analysed by determining the

performance of the generated designs in terms of capturing solar radiation. The results of such analysis are then discussed to guide the further development of the grammar.

## 4.2 Typologies

The ultimate goal is that the envisioned methodology be applied in the design of the outer envelope of any type of buildings. However, in the initial phase of the grammar development, the following building types were identified as priority:

- Single-family houses and collective housing buildings, due to the high number of buildings of this type existent and designed for urban areas worldwide;
- Commercial, Office and Industrial Buildings, due to the high energy consumption associated with these building types;

## 4.3 Shape Grammar

According to the shape grammar formalism [3], a grammar has four main components:

- (1) S – a finite set of shapes, forming the vocabulary;
- (2) L – a finite set of symbols, that constrain the way in which rules can be applied;
- (3) R – a finite set of shape rules of the form  $\alpha \rightarrow \beta$ , where  $\alpha$  is a labelled shape in the set  $(S, L)^+$  composed by all the shapes S and all the labels L of the grammar, and  $\beta$  is a labelled shape in the set  $(S, L)^*$  composed by the set  $(S, L)^+$  and the empty labelled shape, which allows the end of the generative process -- to a shape with labels is applied a shape rule, a shape with an empty label ends the process;
- (4) I – a labelled shape in  $(S, L)^+$  called the initial shape.

The shape grammar presented in this article is a preliminary version of the envisioned grammar and, therefore, is not a finished grammar. It is comprised of a parametric initial shape (I) defined by the designer of the building, to which symbols (L) are assigned to constrain the application of different rules (R). The designs obtained by applying the different rules of the grammar to a parameterized initial shape are assessed in order to verify their performance in terms of capturing solar radiation and, consequently, regarding their potential for generating electrical energy. A brief description of the developed grammar is provided below.

### 4.3.1 Initial Shape (I)

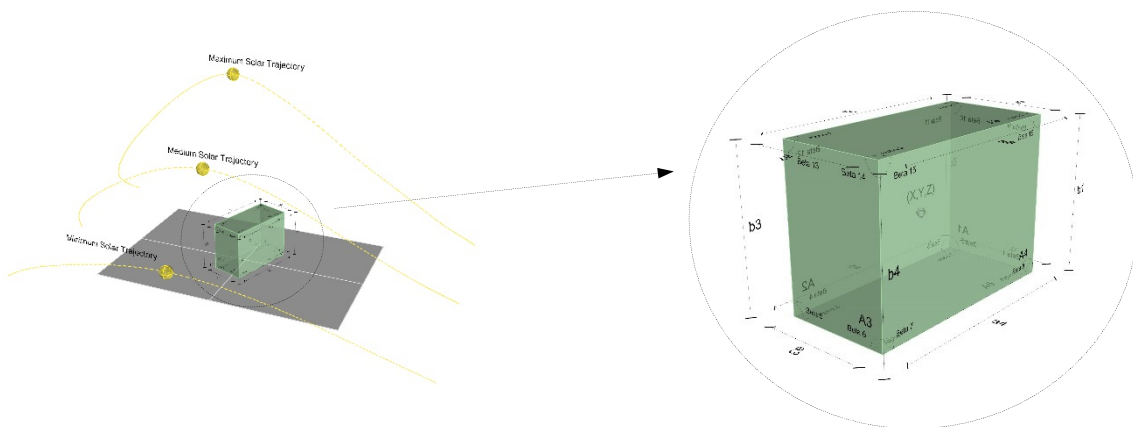


Figure 2: Example of an Initial Shape (I) with its labels (L) on a given location and with a given solar orientation. The corresponding trajectory of the sun also is shown.

The first step in the process of applying the grammar is to define a simple basic shape, like the parameterized oblong shown in Figure 2. Once the designer defines this initial shape labels are automatically inserted by the system. These labels identify:

- Solar Trajectory (it must be indicated the geographic location of the building);
- Geometric Centroid (GC) with coordinates (x, y, z);
- Edges in the xy planes (a1, a2, ai) and Edges in the xz planes (b1, b2, bi);
- Angles in the xy planes (Alpha 1, Alpha 2, Alpha i) and Angles in the xz planes (Beta 1, Beta 2, Beta i);
- Areas of the shape faces (A1, A2, Ai).

The following parameters associated with the defined 3D shape also are automatically defined:

- Implantation Area (IA);
- Gross Floor Area (GFA);
- Total Useful Area (TUA);
- Number of Floors (NF);
- Height between Floors (HF);
- Building Height (H); and
- Building Volume (V).

The designer can change and control these parameters during the application of the rules of the grammar. These parameters have an impact on two dependent parameters:

- Electric Energy Generation Value (EEGV); and
- Electric Energy Consumption Value (EECV).

To the initial shape shown in Figure 2 are applied the set of rules designed to improve the initial shape with respect to their potential for electricity generation by means of converting the incident solar radiation. In the envisioned system, after a rule is applied, the system calculates the potential of the resulting shape for generating electricity. If the designer considers the value satisfactory and is happy with the values of the other parameters, s/he may end the generative process. Otherwise, s/he may continue to refine the shape of the outer envelope by applying more transformation rules.

To determine the relative and absolute effectiveness of the proposed rules to improve the shape of the outer envelope, a comparison between the performance of the shapes obtained by applying the rules to the same initial shape was performed. The study included a comparison between the left- and in the right-hand sides of each rule, as well as, a comparison among the right-hand sides of all the different rules. The performance of the shapes was determined by calculating the potential of electricity generation using the Solar Exposure module in the Ecotec 2011 software by Autodesk.

#### 4.3.2 Rules (R)

The five rules included in the preliminary version of the grammar are described in following. Rule 1, shown in Figure 3 and analyzed in Figure 4, rotates the 3D shape to direct it to an optimized position for capturing sun rays. Rule 2, shown in Figure 5 and analyzed in Figure 6, transforms one of the building facade surfaces so as to make it perpendicular to the sun rays. Rule 3, illustrated in Figure 7 and analyzed in Figure 8, transforms one of the roof surfaces of the building, so as to make it perpendicular to the sun rays too. Rule 4, depicted in Figure 9 and analyzed in Figure 10 changes the scale of the 3D shape, to obtain satisfactory values for all the remaining parameters of the building. Rule 5, shown in Figure 11 and analyzed in Figure 12, performs a topological transformation of the 3D shape, so as to make its surfaces perpendicular to the path of the sun along the day and throughout the year, as much as possible.

The presented shape grammar is in development, it will be composed of more rules, which will be described in a future article.

##### Rule 1 - Rotation of 3D shape:

- Rotation of 3D shape, in a way that the surfaces of the building are more exposed to the solar trajectories. This rotation increases the Electric Energy Generation Value (EEGV).

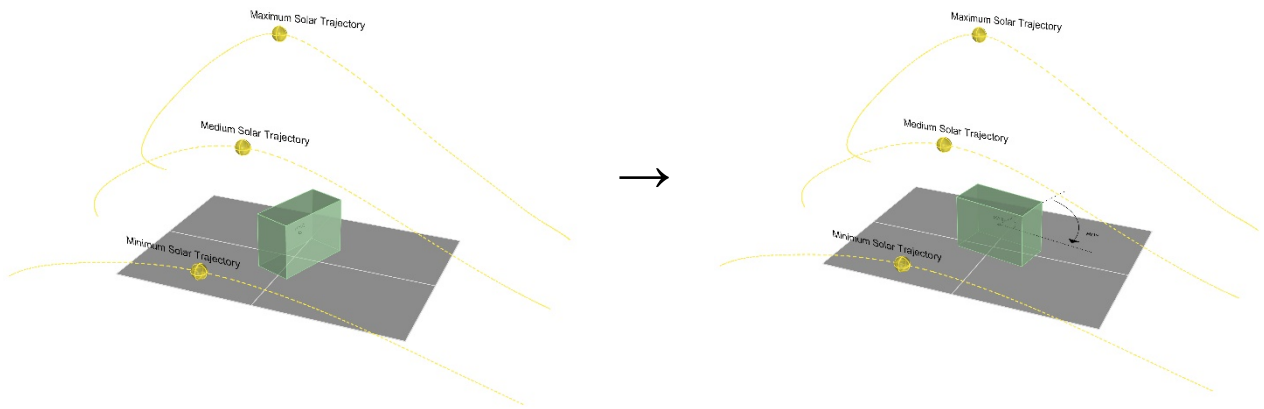
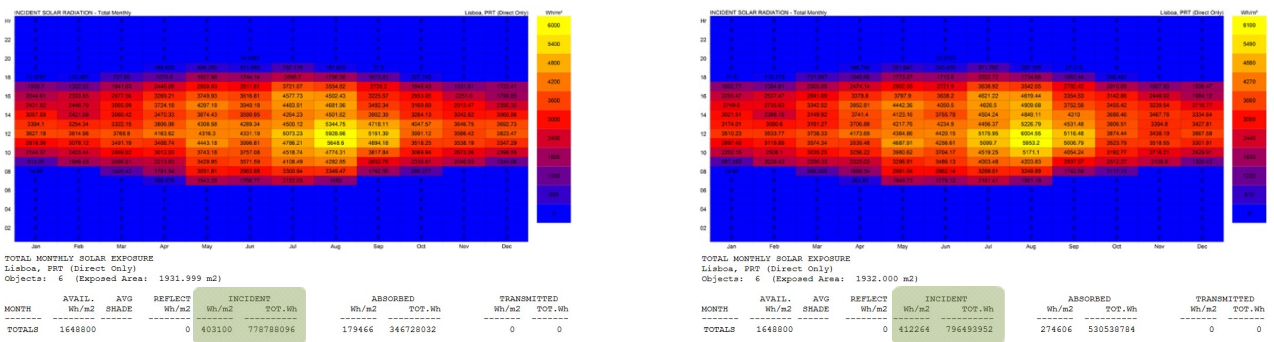


Figure 3 - Rule 1: shape to be transformed (left) and transformed shape (right)



Exposed Area: 1932 m2  
 Incident Wh/m2: 403.100  
 Incident Total Wh: 778.788.096

Exposed Area: 1932 m2  
 Incident Wh/m2: 412.264  
 Incident Total Wh: 796.493.952

Figure 4 - Rule 1: values of Solar Exposure of the Shape to be transformed (left) and the transformed Shape transformed (right)

Rule 2 - Linear Transformation of 3D Shape by re-orienting its larger wall surface:

- Transformation of 3D shape to make its larger surface more exposed to the solar trajectory by turning it perpendicular to the sun rays, when the sun is located at the mid point (12 am) of his medium solar trajectory along the year. This increases the Electric Energy Generation Value (EEGV) because when the sun rays incide perpendicular to a surface their conversion to electrical energy is more efficient.

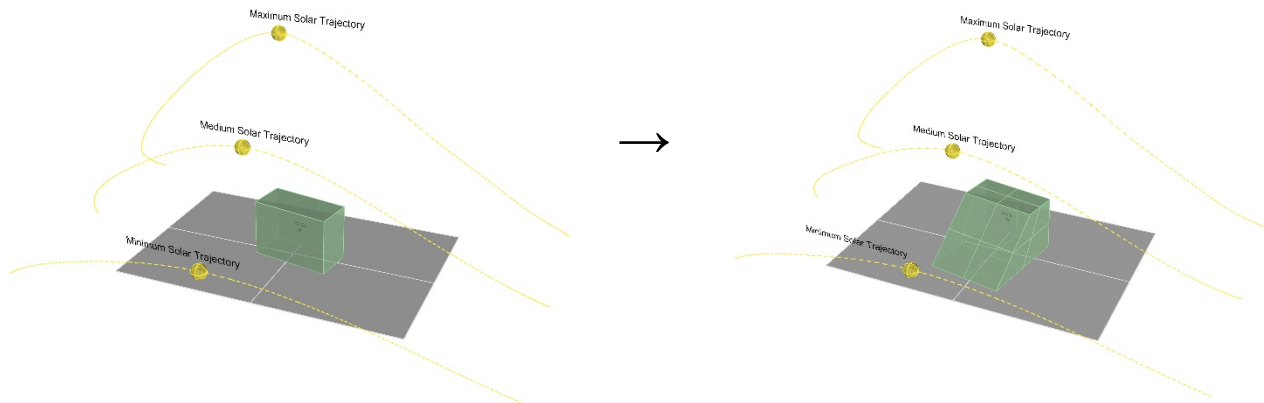
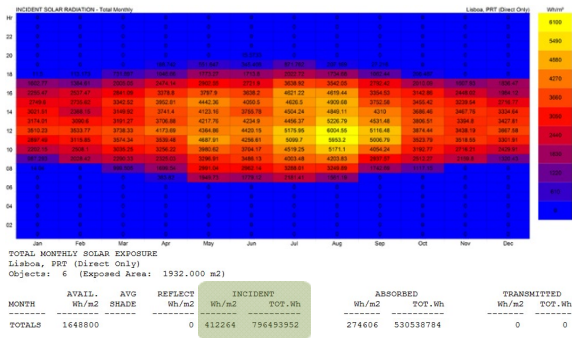
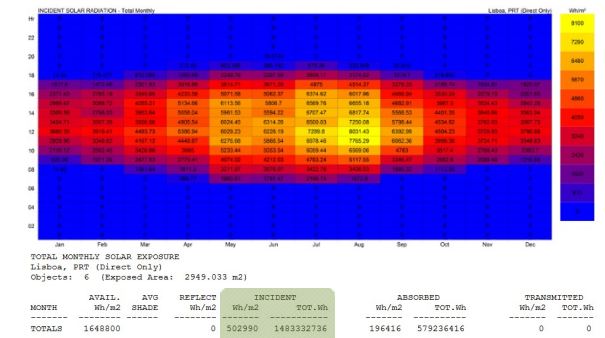


Figure 5 - Rule 2: shape to be transformed (left) and transformed shape (right)



Exposed Area: 1932 m2  
 Incident Wh/m2: 412.264  
 Incident Total Wh: 796.493.952



Exposed Area: 2949 m2  
 Incident Wh/m2: 502.990  
 Incident Total Wh: 579.236.416

Figure 6 - Rule 2: values of solar exposure of the shape to be transformed (left) and of the transformed shape (right)

Rule 3 - Linear Transformation of 3D shape by re-orienting its larger roof surface:

- Transformation of 3D shape in a way that the roof surface is transformed into a surface perpendicular to the sun rays, when the sun is located at the mid point (12 am) of his medium solar trajectory along the year. This increases the Electric Energy Generation Value (EEGV), because when the sun rays incide perpendiculary on a surface their conversion to electric energy is more efficient.

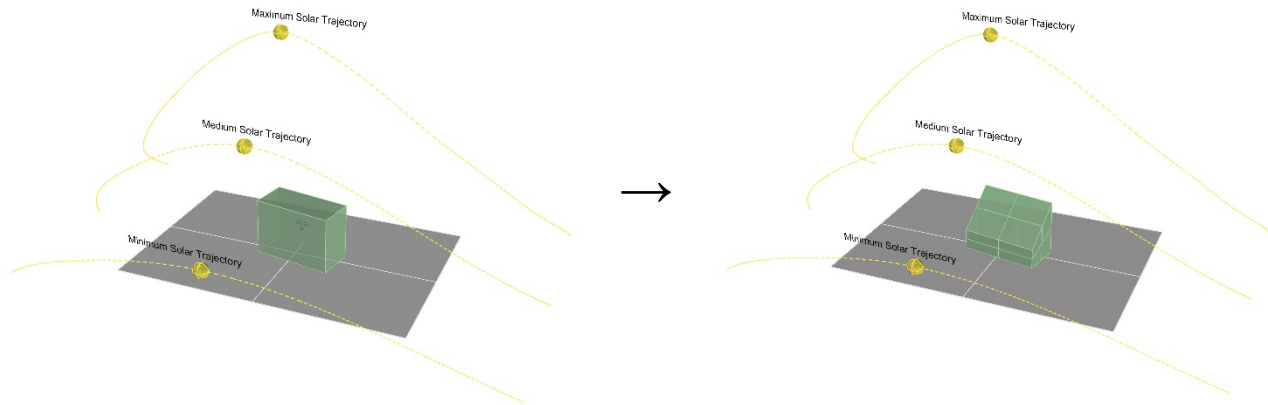
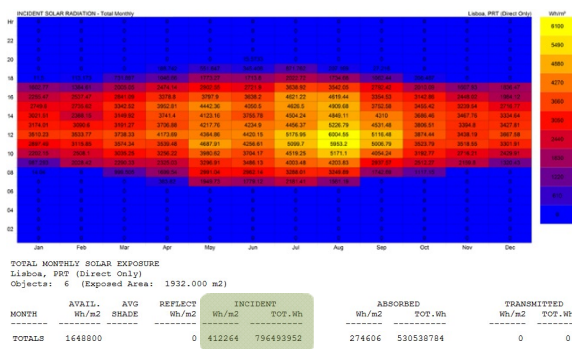
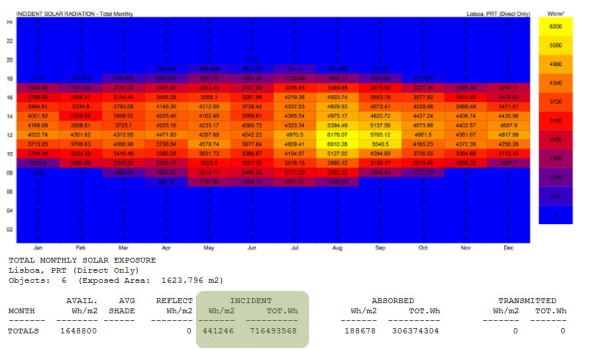


Figure 7 - Rule 3: shape to be transformed (left) and transformed shape (right)



Exposed Area: 1932 m2  
 Incident Wh/m2: 412.264  
 Incident Total Wh: 796.493.952



Exposed Area: 1624 m2  
 Incident Wh/m2: 441.246  
 Incident Total Wh: 716.493.568

Figure 8 - Rule 3: values of solar exposure of the shape to be transformed (left) and of the transformed shape (right)

**Rule 4 - Linear Transformation of 3D shape by scaling it:**

- Scaling of 3D shape, using equal or different scaling factors along the three axis (x, y, z), in order to increase the values for all the building parameters, particularly, the Gross Floor Area (GFA), defined by the designer.

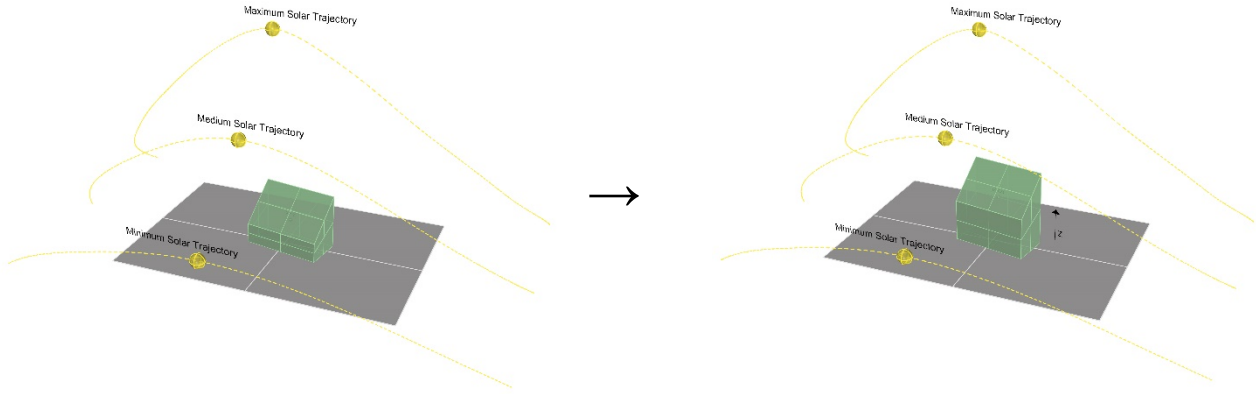
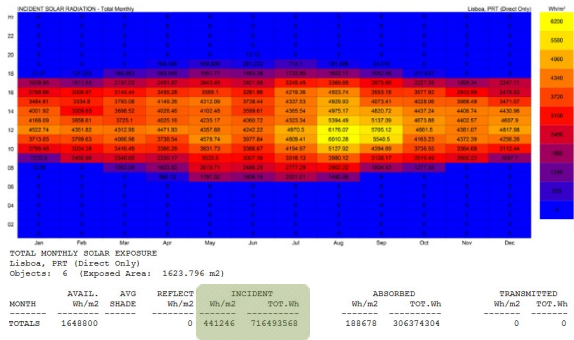
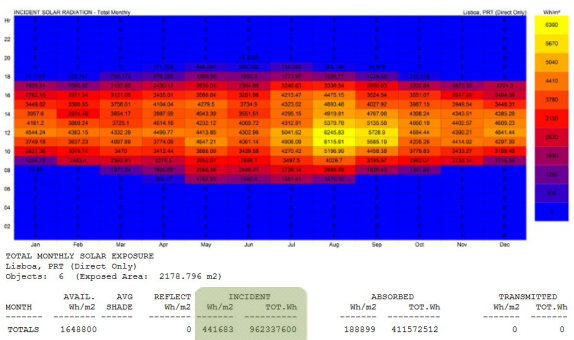


Figure 9 – Rule 4: shape to be transformed (left) and transformed shape (right)



Exposed Area: 1624 m2  
 Incident Wh/m2: 441.246  
 Incident Total Wh: 716.493.568



Exposed Area: 2179 m2  
 Incident Wh/m2: 441.683  
 Incident Total Wh: 962.337.600

Figure 10 – Rule 4: values of solar exposure of the shape to be transformed (left) and of the transformed shape (right)

**Rule 5 - Topological Transformation of 3D shape:**

- Topological transformation of 3D shape so that its surfaces become perpendicular to the solar rays along the day and throughout the year. Lines of the Maximum Solar Trajectory and Minimum Solar Trajectory are projected on the surfaces of the building, and the building surfaces between these projected lines replaced by a continuous surface parallel to the solar trajectory along the day and throughout the year. This transformation increases the Electric Energy Generation Value (EEGV).

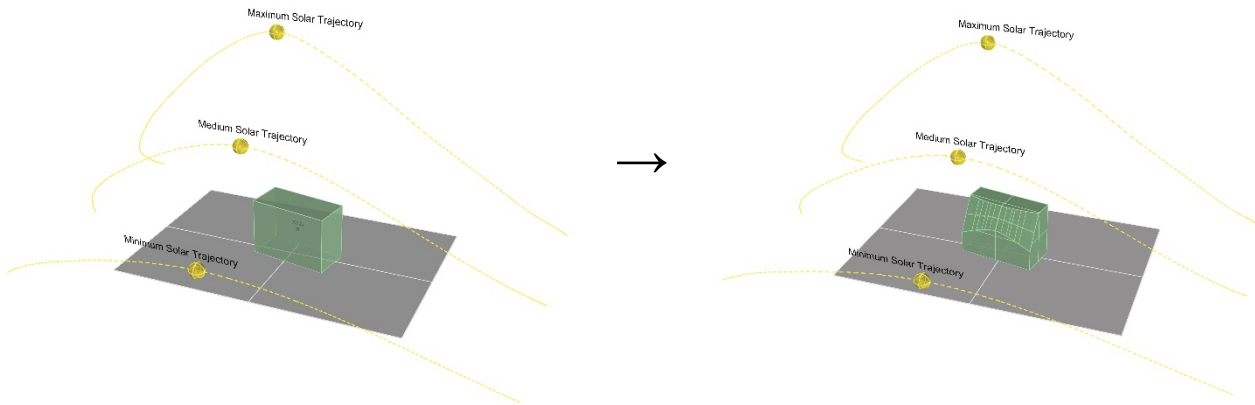
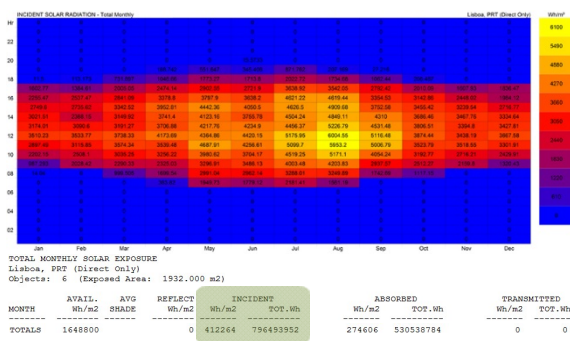
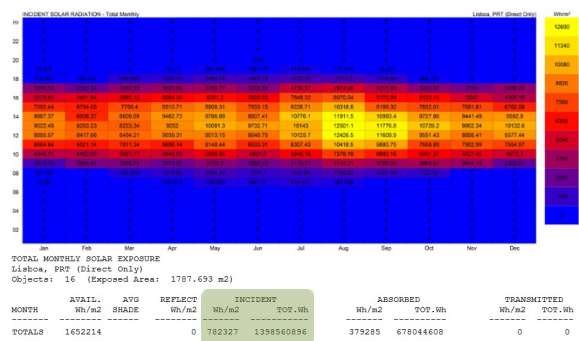


Figure 11- Rule 5: shape to be transformed (left) and transformed shape (right)



Exposed Area: 1932 m2  
 Incident Wh/m2: 412.264  
 Incident Total Wh: 796.493.952



Exposed Area: 1788 m2  
 Incident Wh/m2: 782.327  
 Incident Total Wh: 1.398.560.896

Figure 12 – Rule 5: values of solar exposure of the shape to be transformed (left) and of the transformed shape (right)

#### 4.4 Analysis and Discussion of Results

The analysis of results obtained by assessing the performance in terms of solar exposure of shapes transformed by the proposed grammar rules shows that Rule 1, rotating 3D Shape, does increase the ability to capture sun rays, but Rules 2 and 3, transforming 3D shape by making it perpendicular to the average solar trajectory, achieve even better results. This evidence is supported by the values of the parameter "Incident W/h m2", which indicates the amount of exposure to sun rays per m2 of the surfaces of the shape being measured. This is a parameter that results from the ratio of two other parameters: "Incident Total Wh," which indicates the total amount of sun rays incident on the shape, and "Exposed Area," which indicates the value of the total area of the outer envelope, including the surface in contact with the ground. The ratio "Incident W/h m2" results from dividing the parameter "Incident Total Wh" by the parameter "Exposed Area."

Rule 4 scales the building by increasing only the height of the shape to transform. It affects mainly the parameters related with the area, the height and the total amount of sun rays incident ("Incident Total Wh") of the evaluated shape. The value of the parameter "Incident W/h m2", more related with the efficiency of the shape, remains approximately the same.

Rule 5 produces the transformation that leads to better efficiency in capturing sun rays. It results from the projection on the shape of the higher and lower trajectories of the sun along the day and throughout the year (the solstices) on a given geographical location. Between the rows of the solar trajectories projected onto the

shape it is designed a slightly undulated surface, which is continuously parallel to the intermediate solar trajectories between the highest and the lower trajectories. This geometry causes the solar rays from the different trajectories to be perpendicular to the surface in several points of the transformed shape, which leads to greater efficiency in converting energy from the sun rays. As such, the shape obtained by the transformation operated by Rule 5 is the one that presents higher values of the parameter "Incident Wh/m<sup>2</sup>", thereby generating the most efficient shape with regard to the potential for electricity generation in the outer envelope of the building in question.

## 5. Conclusions

The current paper presents the initial stage in the development of a design methodology to maximize the amount of electrical energy generated on the outer envelope of buildings, including the roof and the facades. The proposed design methodology resorts to the use of a Shape Grammar that can be used to transform the shapes designed by architects, in the conceptual phase of their architectural projects, in more efficient shapes from the point of view of electrical energy generation on the outer envelope of buildings. The aim is to implement the grammar into a computer program to serve as a design tool to assist designers in the initial phase of the design process.

The paper describes the preliminary version of the shape grammar, including the parametric initial shape, the set of five shape rules, and how the latter can be applied to former to transform the initial shape taking into account the geographic location and the solar orientation. Next, it analyzes the performance of the different shapes obtained by the application of the rules in respect to their efficiency in capturing the solar rays and, thus, in respect to their potential for electrical energy generation. Results show that Rule 5, which performs a topological transformation, it is the one that leads to envelope shapes with better performance.

The next steps of the research will be concerned with adding more rules to the grammar, and with the development of the computer implementation.

## 6. Acknowledgements

The authors wish to acknowledge the Program AUSMIP+, funded by the European Commission (Grant Agreement 2010-5094/8) for Daniel Mateus' research grant (X50-0-026-0136-Y60-A), under which the research described in this article is being developed.

## 7. References

- [1] J. Laustsen, "Energy efficiency requirements in building codes, energy efficiency policies for new buildings", *International Energy Agency (IEA)*, Paris, France, 2008.
- [2] V. Granadeiro, "Early design and optimization of the building envelope: Integrating architectural generative design systems and energy performance calculation", *Ph.D. in Sustainable Energy Systems*, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, 2013.
- [3] G. Stiny, "Introduction to shape and shape grammars", *Environment and Planning B: Planning and Design*, Vol. 7, 1980, pp. 343-351.
- [4] J. P. Duarte, "Customizing Mass Housing: A Discursive Grammar for Siza's Malagueira Houses", *Ph.D. in Architecture*, Massachusetts Institute of Technology, 2001.

# From Τέκτων to Τέχνη: going back to the classical roots of Architecture using virtual reality

*Daniel Mateus<sup>1</sup>, Maurício Sousa<sup>2</sup>, Rui de Klerk<sup>3</sup>, Sandra Gama<sup>4</sup>,  
Joaquim Jorge<sup>5</sup>, José Pinto Duarte<sup>6</sup>  
<sup>1,3,6</sup>CIAUD, Faculty of Architecture, University of Lisbon <sup>2,4,5</sup>INESC-ID, Técnico,  
University of Lisbon*

*<sup>1,3,6</sup>{dmateus|ruideklerk|jduarte}@fa.ulisboa.pt  
<sup>2,5</sup>{antonio.sousa|jorgej}@ist.utl.pt  
<sup>4</sup>sandra.gama@tecnico.ulisboa.pt*

*In Classical Greece the design and construction of buildings were interconnected, forming a single activity. With the development of knowledge and technology, this process has fragmented, giving rise to different activities, performed by various professionals, such as the architect, the engineer and the builder; leading to problems related with information exchange between them. With the research projects Tecton and Technos, we intend to reunite these activities again, seeking to simplify the building production process. In Tecton, we propose an Immersive Virtual Reality Environment to sketch and model objects in an interactive way, using hand gestures and body postures, enabling architects to change between the viewpoint of the creator and that of the user; thereby designing buildings while experiencing them at full-scale at the same time. In the future Technos project, our vision is develop detailed 3D virtual models to serve both as supporting elements for the digital fabrication of building parts and as communications elements for the assembly and construction of buildings.*

**Keywords:** *Human-Computer Interaction, Immersive Virtual Reality Environment, Immersive Interaction, Real Time Design, Construction Models*

## 1. INTRODUCTION

### **1.1 From Τέκτων to Τέχνη: using virtual reality to enable the design and construction of buildings in an interactive way**

At the time of Classical Greece the design and construction of the buildings were interconnected, forming a single activity. With the development of knowl-

edge and technology, the process of design and construction of buildings fragmented, giving rise to different activities and professions such as architects, engineers and builders. This process of specialization of knowledge and professions led to communication and information exchange problems between different areas of expertise (Duarte, JP: 2004).

With the Tecton (from the Greek Τέκτων: to

build) and the Technos (Greek Τέχνη: literally craft or art) projects we intend to develop an approach to the activities of design and construction that seeks to integrate and simplify the building production process. Our aim is to develop tools that support architects first, in the process of designing, and second, in the process of communicating information for construction. In the Tecton research project, we explore a way of designing inspired in the ancient Greeks, but using virtual 3D models instead of physical ones. The intention is to apply existing Human-Computer Interaction techniques to architecture design and urbanism, through which one can sketch and model objects using hand gestures and body postures. We propose an Immersive Virtual Reality Environment where architects can shift between the point of view of the creator and that of the user, that is, while allowing them to design buildings and urban spaces it also enables them to experience them at full-scale. From the Tecton project, we intend to evolve to the Technos project. As Greek architects developed and communicated their ideas to builders through rigorous and detailed three-dimensional physical models (Hewitt, M.: 1985), in the Technos project we propose to develop 3D detailed virtual models instead. Our vision is to use these models as construction models serving both as supporting elements for the digital fabrication of building parts, and as communication elements for the proper assembly and construction of buildings and urban areas.

### **1.2 Architect: From Designer-Builder to Designer and Modeler in the Computer**

In the initial phase of construction of shelters and of the first iconic buildings such as military and religious buildings, there was no distinction between design and construction. The same individuals conceived and built at the same time, in a relatively intuitive manner and according to tradition, the housing or the emblematic building they wanted, "using processes and materials improved with the contribution of each generation. Each generation had the possibility to build their houses using traditional materials

and housing types, that were suitable to meet their needs and expectations. It was not necessary special expertise in terms of design." (Duarte, JP: 2004) This type of integrated design and construction activity was not practiced by architects, but by individuals to whom the term of "Designers-Builders" can be applied, they were the precursors of today's architects.

The Architect emerged in classical Greek civilization, with the term coming from the Greek word "arkhitektôn" meaning "the main builder." The architect as a profession stemmed from the need to order and organize the construction of larger and more complex buildings than ordinary housing, like temples. The Greek "Designers-Builders" did not use drawings, they conceived and communicated their ideas to other builders on site through words and full-scale physical models. It is possible to date this type of practice to as early as the year 725 BC (Hewitt, M.: 1985). Later, during the Middle Age, the Gothic Masons Masters also used full-scale physical models as an aid for the design and construction of complex cathedrals and churches. However, in some cases, they have also resorted to drawn plans as aids to conception. This medieval period is, nevertheless, regarded as experimental and exploratory concerning the use of drawing for the design and communication of ideas for constructing buildings, being the paradigm of the architect or master builder as a "Designer-Builder" the main trend still.

It is only in the fifteenth century, during the Renaissance, that architects began to use drawings consistently, in particular linear perspectives, as tools for conceiving their projects. It is, therefore, in the Renaissance that a full separation between design and construction in the building production process occurs. The architect is solely dedicated to design activity, using drawings on paper to conceive buildings, and then using such drawings to communicating the construction process of the designed buildings to builders. From the paradigm of the "Designer-Builder" of Classical Antiquity and the Middle Age, the architect moves to the paradigm of the "Designer on Paper" in the Renaissance and in the subsequent

ages. Only from the late eighteenth century, the Age of Enlightenment, when Neoclassicism prevailed as architectural style, did drawings in orthogonal projection prevailed over linear perspectives. Later on, from the nineteenth century until the third quarter of the twentieth century, with the advent of the Industrial Revolution and Modernism, perspective drawings were used again in the conception, representation, and communication of building designs, together with orthogonal projections, such as plans, sections, and elevations. However, the kind of perspective preferred in this era was the isometric perspective, instead of the linear or conical one to permit the accurate dimensioning of buildings.

In the last quarter of the twentieth century, in the Post-Modernism era, with the emergence and dissemination of the computer, this replaces the role of the paper as a support element for designing in architectural design. As such, from the "Project Designer on Paper", the architect turns into a "Project Designer and Modeler in the Computer". After an initial phase, in which the computer merely substituted the paper as the support of design activity, making faster and rigorous the process of developing an architectural project, another phase emerged, the present one, in which the focus is on modeling, making 3D computer models using the BIM paradigm (Building Information Modeling), and then extracting from these 3D models 2D drawings and 3D images. In a synthetic wayshort, this is the current context of architectural design activity. The evolution of architect types just

described is depicted in Figure 1.

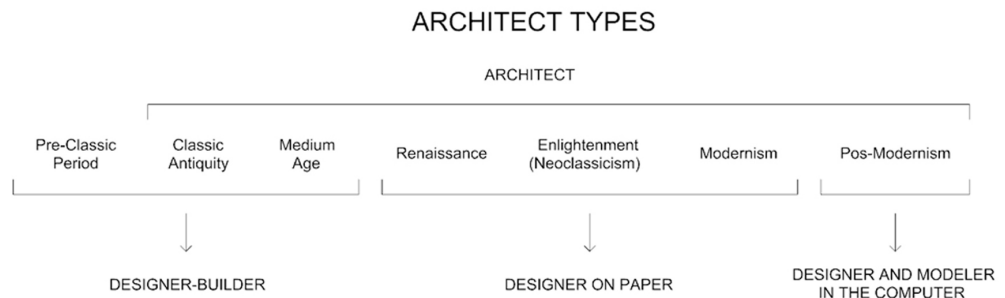
### 1.3 Human-Computer Interaction Paradigms

In the current type of architect, the architect as "Designer and Modeler in the Computer", two dominant paradigms of human-computer interaction can be identified to date (Figure 2).

The first paradigm is the interaction of designers with desktop computers and laptops, which we would call "Paradigm of Interaction with Intermediate Devices" given the fact that the interaction with the computer is mediated by intermediate devices such as the mouse, the touchpad, the keyboard and the monitor, with the latter being used for the visualization of 2D drawings and 3D models on a two-dimensional screen. In this paradigm, a certain distance between the designer and the drawing is maintained, being the kind of interaction indirect. The second paradigm is the "Tactile Interaction Paradigm" and refers to the interaction of designers with tactile interfaces, such as tablets, smartphones and interactive multi-touch displays. In this case, interaction is direct, as the designers can use one or both hands to draw and model in the virtual environment; however, they still need to visualize their creations on a two-dimensional screen that simulates the effect of three-dimensions.

The goal of the Tecton and Technos research projects is to implement a new interaction paradigm between designers and the computer, which we

Figure 1  
Architect types  
along the History



would call the "Immersive Interaction Paradigm." In this paradigm, designers sketch and model directly with their hands in an Immersive Virtual Reality Environment, allowing them to see and experience with their bodies a three-dimensional virtual environment. The predecessor of this paradigm is the semi-immersive environment based on a stereoscopic multi-touch display, proposed by Araújo et al. (2012), which explored a direct modeling approach to create, edit, and manipulate 3D models, through asymmetric bimanual interaction on and above a two-dimensional display surface. This approach explored the continuous space as presented by Marquardt et al. (2011) combining it with the bimanual asymmetric model proposed by Guiard (1987). In the Tecton and Technos projects, we intend to go further, by exploring a complete immersive, three-dimensional virtual reality environment, increasing the degree of interactivity of designers with the computer, so as to permit design and visualization in real time. The goal is to facilitate and even encourage designers' creative activity, by making more natural and spontaneous to sketch, model, and experience the virtual objects and scenarios being created, thanks to the use of designers' own hands and body.

## 2. REQUIREMENT ANALYSIS

### 2.1 Task and Sub-Task Descriptions

The main objective of the Tecton project is the implementation of an "Immersive Interaction Paradigm" in an immersive virtual reality environment where it is possible for designers to interact more direct and spontaneously with the computer during their

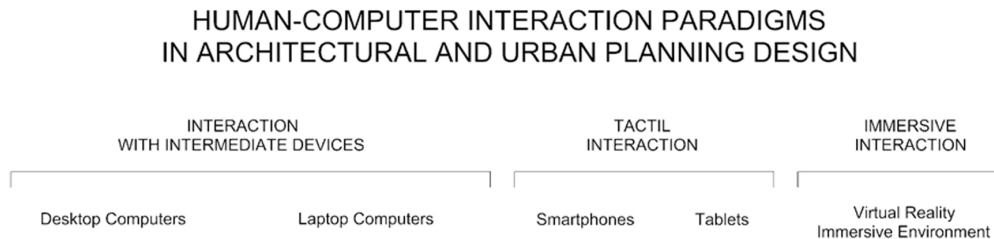
creative process than in conventional CAD systems. With this goal in mind, our research was initiated with a Requirement Analysis task, aimed at gathering relevant information for the creation of the intended 3D sketch and modeling system. The Requirement Analysis task consisted of three tasks, each with its own objectives, as follows:

- Sub-Task 1.1: Identify the benefits of mixed and virtual reality and the needs of users in the field of architecture, taking into account their workflow;
- Sub-Task 1.2: Define which modeling and editing operators are required during architectural design, and how these can benefit from interactive procedural techniques to increase efficiency in modeling tasks;
- Sub-Task 1.3: Define the interaction metaphors and the use scenarios that best fit the needs, preferences, expertise and capabilities of users in a viewing environment in mixed or virtual reality, such as stereoscopic table or glasses systems.

Under Sub-Task 1.1, the following activities were developed to collect the required information:

- A Generic Characterization of Users, where it was conducted a survey of architects registered in the Portuguese Association of Architects, over the internet, intending to collect information about their professional environment, the working models and the computer

Figure 2  
Human-Computer  
Interaction  
Paradigms



programs they use in the different phases and procedures of the architectural design process;

- A Review of the existing 3D Modeling Software, intending to analyze the features of computer programs most commonly used in 3D modeling;
- A Case Study Analysis, namely an architectural design office, in order to complete the gathering of information through a closer contact with the target users, the architects. The case study analysis included an Interview with the main and the principal architects in the office, where we discussed topics like their work process, their use of computers and computer programs, and the organization of their presentations and meetings with clients and engineering teams. The case study analysis also included a monitoring people working in the office, to observe and analyze in loco the office's activity. A User and Task Analysis allowed a more thorough characterization of the studio's employees (age, experience and others) as well as learn more about the tasks they perform, in order to use such information in the course of the Tecton Project. This office was chosen for being known for their technology-oriented process and proficiency in the use of computers. Figure 3 shows some images collected at the office, depicting its working environment and tools.

Because of the extent of the gathered information, in the next sub-chapter we only present results extracted from such information that we considered more relevant for the development of the next tasks of the Tecton Project. Sub-Tasks 1.2 and 1.3 were initiated with the development of preliminary prototypes, described in Section 3, according to some preliminary ideas of the stakeholders in the research Project, while Sub-Task 1.1 was being developed. In a future phase, such prototypes will be reviewed to incorporate the results of Subtask 1.1 more extensively.

As such, the next sub-chapter describes only the results of the Sub-Task 1.1, leaving the results of Sub-Tasks 1.2 and 1.3 for a future article.

## **2.2 Summary of Requirement Analysis Results**

From Sub-Task 1.1 of the Requirement Analysis, it was possible to extract the following results for the Tecton Project:

- Architects prefer a model like "Sketch by Hand" in the conceptual stage of the architectural design process. They consider "Sketch by Hand" easier to learn and to use than computer tools. They consider it a "fast" tool, meaning that it allows one to test and experiment ideas in a faster and more spontaneous way. "Mockup by Manual Manufacturing" is also considered a good tool because it enables to test and visualize three-dimensional ideas, in a physical way. It presents, nevertheless, the disadvantage of not being a tool as easy and quick to use as "Sketch by Hand" and "Drawing in the Computer". The use of "Drawing in the Computer" is used essentially to ensure greater rigor and precision in the architectural design project. In the construction design phase, when it is necessary to produce accurate drawings and written pieces, the computer is the most used tool because it makes the production process faster and more efficient. Another important result is that "Sketch by Hand" and "Mockup by Manual Manufacturing" are considered tools that enable greater freedom of creativity than drawing software. Interviewed professionals also think that it is easier and faster to interact with and communicate ideas to clients and engineering teams using sketches by hand and physical models than using computer drawings and software.
- Architects seem to prefer primarily tools that allow them to explore easily and quickly their ideas in a creative and appealing way, as well

to produce drawings and written pieces in an efficient, fast and accurate way. They also consider important the use of presentation and communication tools that facilitate the interaction and communication with clients and engineers, engaging them and stimulating their participation in the design process.

- One of the key tasks in Architecture is to design buildings to be constructed in the three-dimensional physical space. As such, Architects resort to three-dimensional elements to test and try out their ideas whenever they can, be it sketching in perspective on paper, making a physical mockup, or making a 3D model on the computer. For clients themselves, it becomes more understandable and appealing a 3D image or object than a two-dimensional drawing. However, it is worth to mention that tools like sketches by hand and 2D and 3D drawings in the computer only simulate the effect of depth, they are not three-dimensional tools in the strict sense of the term. As such these tools have their limita-

tions in terms of conveying 3D spaces.

- Some drawing and 3D modeling software, in addition to the basic modeling (direct creation and editing of three-dimensional shapes, as cubes or spheres), enable the use of Parametric Modeling and Procedural modeling. The former allows one to create and edit three-dimensional shapes by defining and assigning values to parameters like length, width and height, while the latter permits one to create and edit three-dimensional shapes by defining and controlling generative procedures, such as algorithms and shape grammars. These more sophisticated tools allow the generation of complex 3D shapes, which in the case of Procedural Modeling are not directly drawn by the architect, but rather the result of a procedure defined a priori, taking into account various criteria, such as structural performance, thermal comfort, and so on. Future trends in the development of 3D modeling software seem to be the simultaneously integration of the three modeling techniques:



Figure 3  
Images from the architectural office used as a case study, from left to right and top to bottom, main room (left-up), physical mockups, physical mockups room and sketch drawing

the basic, the parametric and the procedural, ensuring diversity and complementarity between them.

### **3. INITIAL PROTOTYPES**

#### **3.1 Description**

Along with the requirement analysis, preliminary prototypes were developed to test initial ideas for the desired 3D Sketch and Modeling Systems. The developed prototypes are: Air Sketching, World Builder, Virtual Explorer and City Wave. They allow one to sketch, model, visualize and experience three-dimensional simple geometric shapes in an immersive virtual reality environment, through hand gestures and body postures. Such prototypes represent a first approach to the sketch and modeling instruments that we propose and they intend to respond to the results that have been achieved during the requirement analysis.

#### **3.2 Air Sketching**

Results of requirement analysis showed that "Sketch by Hand", on paper, is the work model most commonly used by Portuguese architects, in the design process of architectural projects. This preference is due to the fact that it is a tool with execution speed, easy to learn and easy to perform. It allows one to experience ideas in a fast and spontaneous way, thereby promoting creative freedom in the design of three-dimensional shapes. However, "Sketch by Hand" only permits to represent and explore imagined 3D shapes on paper, being therefore a tool that uses techniques such as three-dimensional perspective to simulate the effect of three dimensions on the two-dimensional support that is paper. Through the prototype Air Sketching (Fig. 4), we intend to develop an instrument that enables architects to sketch directly in three dimensions, in an immersive virtual reality environment. We believe that it can lead to faster and easier execution and facilitate the learning of sketching by hand as a tool in the design process. The aim is to provide architects with a new instrument that stimulates the creative process in the

early stages of the design process. Users of the system can draw freehand and move their own body in virtual space, watching and experiencing their designs at the same time.

The Air Sketching system consists of a virtual reality display attached to the head (Oculus Rift) and a motion capture device (OptiTrack) in a physical interaction space of 24 cubic meters (4 x 3 x 2 meters), providing the user with the ability to move freely within a virtual scenario. With stereoscopic vision display, the user can see the three-dimensional virtual space and move in that space as it moves in the real world. The user interacts with this virtual space through a Wii-Remote command, simulating the use of a "virtual pen", through which he may sketch and outline ideas. The command is used in the user's dominant hand. In the non-dominant-hand it is placed another device that serves to enable and disable a menu of options in the graphic interface, depending whether the hand is facing up or down, respectively. The prototype runs by combining data received by the OptiTrack device, by the Wii-Remote command, by the signal buttons of the command, and by the device in the non-dominant hand, processing this information through a Unity 3D rendering engine, which in turn returns a visual result to the user through the Oculus Rift display.

#### **3.3 World Builder**

The "Mockup by Manual Manufacturing" is also a commonly used work model in the design process of architectural projects. During the requirement analysis, in the case study of the Portuguese office, it was observed that this work model is the preferred design tool, having "Sketch by Hand" a more secondary role, serving essentially as an aid to the development of mockups. The choice of the mockups as work models is due to the fact that they are three-dimensional elements that represent objects and spaces that also are three-dimensional. As such, they constitute a more direct approach, compared to sketching by hand, given the three dimensional nature of architecture. With the prototype World Builder (Fig. 5)

we intend to provide the user with a mockup elaboration system in a virtual environment rather than a physical environment. The aim is to provide greater speed and ease of implementation to the development of mockups, allowing further exploration of design ideas and shape hypotheses, with ensuing benefits for the creative process in architectural design. World Builder is, in this way, dedicated to 3D modeling, allowing users to model basic solids such as cubes, parallelepipeds, cylinders, cones and spheres, and to develop more complex models through the composition of these different solids. The user can select the solids he wishes to work with using a menu that can be activated in the graphic interface.

Modeling proceeds by using two-hand gestures. In one hand rests the Wii-Remote control, like in Air Sketching and, on the other hand, a device similar to a ring with two buttons, which is an additional instrument relative to Air Sketching that gives the user more options for the control of modeling activities. From the joint action of the gestures of the two hands, it is possible to control the position and scale of the modeled solids. The prototype operates in the same manner as Air Sketching, combining data from the various devices and processing this information using a Unity 3D rendering engine, which in turn returns visual output to the user through the Oculus Rift display.

### 3.4 Virtual Explorer

It was also possible to verify during the requirement analysis that architects consider important how objects and spaces are visualized, either during the design process or during the process of communicating their designs to clients or engineers. The use of computer 3D images is a feature used often to visualize and communicate design ideas. Mockups produced by hand also serve for this purpose, being widely used in the architecture office used as case study. With the prototype Virtual Explorer (Fig. 6), we intend to overcome difficulties caused by the use of still 3D images, which represent only partial views of the designed building. In addition, we want to overcome difficulties connected to the scale of the mockups, which is normally smaller than the scale of the designed buildings. Virtual Explorer is a system that allows one to navigate in a virtual environment using the navigation technique known as "Walking-in-Place" (WIP). This system allows users to explore the modelled objects and spaces at full scale, by walking along them and observing them from different viewpoints, either during the design process to test and guide design options, or during the review process to communicate the design to clients and engineers.

The WIP system works by having users walking on the same spot (hence the name walking-in-place), within a small sized area of interaction. In this way, users control the position of an avatar (virtual replica of a person) that remains invisible in the virtual three-dimensional model. The views generated by the ef-

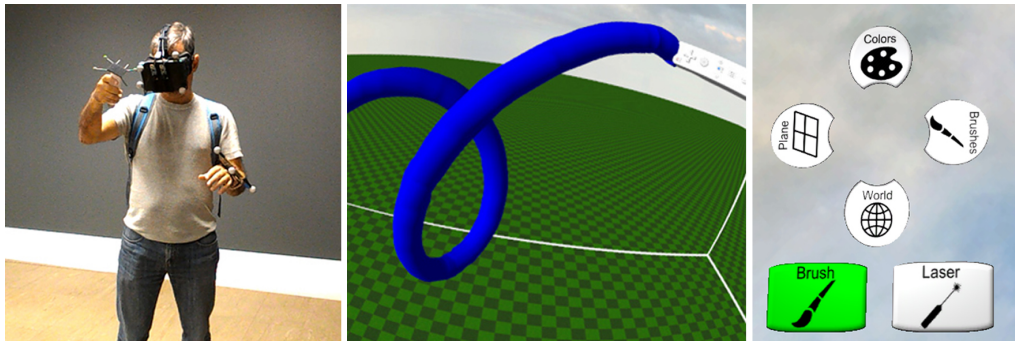
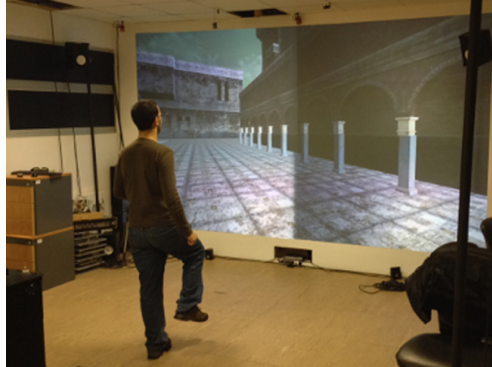


Figure 4  
User using the  
Wii-Remote control  
(left), freehand  
sketch in 3D using  
the Wii-Remote  
control (middle)  
and the Options  
Menu (right)

fect of this technique can be viewed in different types of displays: Head-Mounted Displays (HMD), Cave Automatic Virtual Environments (CAVE) and flat screens of different sizes. The data generated by the movement of the user's legs and feet are captured during lifting and lowering, being used by the system to control avatar speed using a series of algorithms based on different variables, like stepping frequency.

Figure 6  
Walking-in-Place  
technique in Virtual  
Explorer



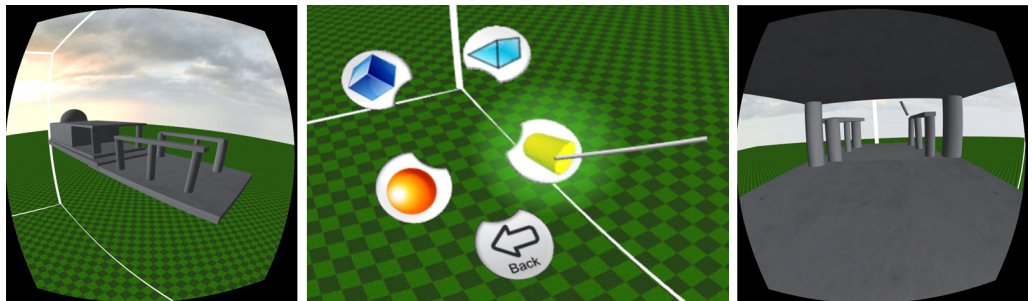
### 3.5 City Wave

Another fact observed during the requirement analysis task was that few software are equipped to deal with the complexity of urban planning, which involves the acquisition, management and manipulation of a considerable amount of information. The prototype City Wave (Fig. 7) aims to overcome this limitation. It consists of a prototype of a more interactive instrument for urban planning and design,

as it allows the expeditious creation of urban scenarios through hand gestures performed in space over a stereoscopic table. Used in early stages of urban planning, it may provide the means to explore different urban scenarios and assist processes associated with urban planning that are not supported by current tools. In fact, the City Wave captures hand gestures and uses this information to adjust urban pre-defined parameters, allowing the visualization of the resulting three-dimensional scenarios.

As an initial test, it was created a virtual model to generate scenarios in which land value and buildings' heights are parameters that can be controlled through the movement of hands. In this case, the scenarios are generated based on the position of the hand in space over time: the horizontal position of the hand on the table is mapped to the corresponding coordinates of the land map and the distance of to the table's surface is mapped to the land value. As a result, the higher the hand is located, the greater the value of the property in the corresponding area and, consequently, the higher buildings will likely be. The City Wave may also be used in different scenarios than the one developed for the initial test, as it provides the means to adjust different parameters considered in urban planning. As such, it can be applied to a wider variety of scenarios, thereby enabling planners to create, edit and interactively explore their ideas.

Figure 5  
World Builder  
Mockup (left, right)  
and Options Menu  
(middle)



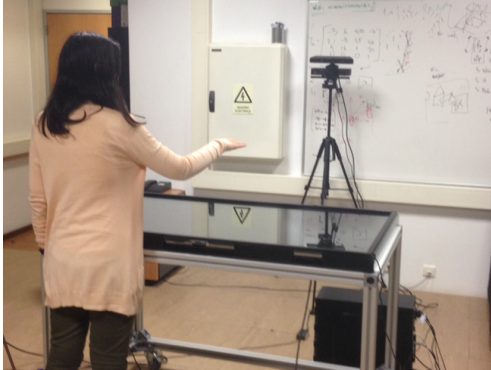


Figure 7  
Hand movement  
over the  
stereoscopic table

#### 4. CONCLUSIONS

In the research project Tecton 3D, we explore a design process inspired in the architects of Classical Greece, but using virtual 3D models instead of physical ones. We propose to apply modern techniques of human-computer interaction in an Immersive Virtual Reality Environment, where architects and urban planners can switch between the creator and the user point of views, designing buildings and urban spaces, while being capable to use and test them at full-scale. The project began with a requirement analysis task, which was intended to gather relevant information to support the creation of the proposed 3D sketch and modeling systems. The collected data allowed us to elaborate four preliminary prototypes: "Air Sketching", "World Builder", "Virtual Explorer" and "City Wave". These prototypes allow one to sketch, model, visualize and experience three-dimensional simple geometric shapes in an immersive virtual reality environment.

Future developments of the Tecton project are to further develop the prototypes described above, following the stipulated work plan, namely the project tasks and sub-tasks, with a special emphasis on establishing, in an immersive virtual reality environment, means of connecting shape grammars and procedural modeling techniques in the design of buildings and urban areas. The intention is to create complex three-dimensional shapes that are not pre-

determined but obtained through procedures established by architects.

From the Tecton project we want to evolve for the Technos project. As the Greek architects communicated their intentions to builders through rigorous and detailed three-dimensional physical models, in the Technos project we intend to develop 3D projects in Virtual Reality that go beyond the initial conceptual process of Architecture and Urban projects. Our vision is to develop accurate and detailed three-dimensional virtual models that may be used as construction models serving both as supporting elements for the digital fabrication of building parts and as communication elements for the proper assembly and construction of buildings and urban areas. It also is worth noting that along the History of Architecture, the tools and instruments used by architects and urban planners influenced their creative activity and the buildings and cities that they have created. We believe that the Tecton and Technos projects can help to develop new instruments for architectural design and urban planning, thereby opening up new paths for performing these activities, which may lead to novel and innovative solutions.

#### ACKNOWLEDGEMENTS

The Tecton 3D Project is funded by the Portuguese Foundation for Science and Technology (FCT) with grant PTDC/EEI-SII/3154/2012.

#### REFERENCES

- Araújo, B., Jorge, J. and Duarte, J. 2012 'Combining Virtual Environments and Direct Manipulation for Architectural Modeling', *Proceedings of eCAADe 2012*, Prague, Czech Republic, pp. 409-418
- Duarte, J.P. 2004, *Tipo e Módulo, Uma Abordagem ao Processo de Produção de Habitação*, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa
- Guiard, Y. 1987, 'Asymmetric Division of Labor in Human Skilled Bimanual Action: The Kinematic Chain as a Model', *Journal of Motor Behavior*, 19, pp. 486-517
- Hewitt, M. 1985, 'Representational Forms and Modes of Conception: An Approach to the History of Architectural Drawing', *Journal of Architectural Education*,

39(2), pp. 2-9  
Marquardt, N., Jota, R., Greenberg, S. and Jorge, J. 2011  
'The continuous interaction space: interaction techniques unifying touch and gesture on and above a digital surface', *Proceedings of INTERACT'11*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, pp. 461-476

# **Tecton 3D – Simulacros Digitais: Modelando a Terceira Dimensão**

Análise de Softwares de Modelação 3D

Daniel Mateus\*

Eduardo Castro e Costa\*

José Pinto Duarte\*

Joaquim Jorge\*\*

## **Resumo**

A presente comunicação visa relatar a experiência do projecto de investigação Tecton 3D, actualmente em desenvolvimento. O Tecton 3D pretende desenvolver um sistema de modelação e visualização 3D que melhore a interacção Homem-Máquina dos sistemas CAD convencionais. A intenção consiste em explorar ambientes virtuais imersivos (ambientes de Realidade Virtual em que o utilizador tem a sensação de estar inserido no ambiente virtual) para proceder às tarefas de modelação e visualização 3D, através do recurso a meios como as mãos e a postura corporal do utilizador, daí resultando uma interacção mais natural, espontânea e apelativa entre o ser humano e o sistema de modelação e visualização 3D. Quer-se igualmente explorar a modelação de cenários 3D complexos de edifícios, por meio do recurso à modelação procedimental por gramáticas da forma (sistema gramatical que é composto por regras formais), oferecendo ao utilizador operadores de criação e edição arquitectónicos mais poderosos do que as abordagens tradicionais de modelação. As conclusões da tarefa de análise dos softwares de modelação 3D existentes na actualidade, também descritas na comunicação, permitem-nos perceber os pontos fortes e os pontos fracos dos actuais softwares, servindo-nos como informação e dados para a elaboração das próximas tarefas do Tecton 3D.

**Palavras-Chave:** Interacção Homem-Máquina; Ambientes Virtuais Imersivos; Modelação Procedimental; Gramáticas da Forma.

\* Faculdade de Arquitectura da Universidade de Lisboa

\*\* Instituto Superior Técnico / INESC-ID

## Introdução

Este documento tem como objectivo relatar a experiência do projecto de investigação Tecton 3D, actualmente em desenvolvimento. Pretende-se descrever os objectivos do projecto, bem como a tarefa de análise de softwares de modelação 3D, realizada no âmbito do mesmo.

O projecto de investigação Tecton 3D surgiu devido à constatação de que os actuais softwares de modelação e visualização arquitectónica baseados em ambientes virtuais imersivos (ambientes de Realidade Virtual em que o utilizador tem a sensação de estar inserido no ambiente virtual), suportam principalmente animação em 3D e navegação automática. Apesar da crescente popularidade dos ambientes virtuais imersivos, estes ainda precisam de percorrer um longo caminho para substituir ou mesmo aumentar as capacidades dos sistemas de desktop CAD na modelação de cenas 3D. As expressões tradicionais dos ambientes virtuais imersivos ainda estão associadas à metáfora do desktop, o qual pretendem substituir, sendo essas expressões baseadas na linguagem do Windows, dos ícones, dos Menus e dos Apontadores. Pior, as linguagens de comando subjacentes a muitos desses sistemas também não acomodam bem a maneira como as pessoas aprendem a projectar, raciocinar e manipular formas tridimensionais. Outro obstáculo que se verifica é o facto de que a modelação de sistemas baseados em formulações paramétricas e geométricas de primitivas, são contrárias às percepções e intuições humanas, no que se refere à leitura, interpretação e relação com o espaço e com os objectos físicos.



Fig. 1 – Logotipo do Projecto de Investigação Tecton 3D

Para resolver este problema é necessário o desenvolvimento de novas técnicas de interacção multimodal baseadas em gestos manuais, mais adequados para tarefas de modelação do que os dispositivos tradicionais de modelação 3D, tornando mais atraentes as técnicas de realidade mista (técnicas que utilizam em simultâneo elementos da Realidade Real e da Realidade Virtual). Estas técnicas, combinadas com modelação procedimental, pretendem suprimir a falta de expressividade ou naturalidade das operações de CAD convencionais. Para isso, queremos criar através do projecto Tecton 3D um novo ambiente de design que combine a visualização estereoscópica com a modelação, simulação e conteúdo reactivo. O resultado pretendido consiste em um ambiente mais favorável para a interacção natural entre o utilizador e o sistema de modelação e visualização, mais próximo da experiência proporcionada através do contacto com modelos físicos, permitindo que o conteúdo seja facilmente criado e editado e que os projectos arquitetónicos sejam rapidamente inspeccionados e validados. Para tal, integraremos no sistema a capacidade de reconhecimento de gestos bi-manuais, bem como a capacidade de aquisição de informações de postura corporal através de sensores 3D. Essas técnicas de interacção, combinadas com modelação procedimental através de gramáticas da forma (sistema gramatical composto por regras formais), irá permitir introduzir mudanças incrementais à manipulação 3D em ambiente virtual imersivo, tornando-a mais vantajosa e apelativa face aos sistemas convencionais de desktop CAD.



Fig. 2 – Cena do Filme "Iron Man" (2008), onde é possível verificar as potencialidades da Realidade Mista para a manipulação e visualização de objectos virtuais, de uma forma interactiva

Para validar as técnicas de interacção e modelação iremos avaliar os resultados deste projecto com escritórios de arquitetura. A partir da análise de tarefas com esses utilizadores, identificaremos as actividades de modelação que podem tirar proveito da realidade mista e encontraremos as metáforas de interacção mais adequadas para a área da arquitetura. A contribuição fundamental do projecto consiste em usar os ambientes virtuais para a exploração e validação do projecto arquitectónico. Neste contexto,

como já foi referido, é de destacar a exploração de técnicas que combinam a visualização e a modelação com a simulação física, a fim de melhorar a interacção entre os utilizadores e os ambientes virtuais.

A modelação procedimental interactiva baseada em gestos será pesquisada em uma tarefa específica, sendo posteriormente avaliada por arquitectos. Isto irá permitir analisar o desempenho de ambientes de realidade mista em modelação, bem como a eficácia dos gestos 3D para interagir nesse ambiente, permitindo simultaneamente perceber como é que a modelação procedimental pode ser usada de forma incremental e interactiva, de modo a fornecer operadores de edição arquitectónicos mais poderosos do que as abordagens tradicionais baseadas em geometrias de sólidos construtivos (por adição, subtracção e intersecção) e em operações como a extrusão e a rotação de perfis lineares. Superando as abstracções actuais das gramáticas da forma, por meio da interacção, pretende-se tornar possível a criação e a revisão de cenários 3D complexos de edifícios, de uma forma mais fácil, natural e incremental.

### **Análise de Requisitos**

A Análise de Requisitos consiste na primeira tarefa do projecto, a qual de um modo geral se destina a identificar de que modos é que os arquitetos utilizam a modelação 3D, seja esta física ou virtual, no seu processo de trabalho. A tarefa tem três objetivos diferentes, organizados em diferentes sub-tarefas. Em primeiro lugar, pretende-se identificar os benefícios da realidade mista, bem como as necessidades do utilizador no campo da arquitectura, considerando o seu fluxo de trabalho (subtarefa 1.1). Em segundo lugar, quer-se definir quais os operadores de modelação e edição são precisos durante um projecto de arquitectura e durante uma revisão de projecto, percebendo também como podem os mesmos tirar proveito das técnicas procedimentais interactivas para aumentar a sua eficiência durante as tarefas de modelação (subtarefa 1.2). Finalmente, definir-se-ão as metáforas de interacção e os cenários mais adequados quando se consideram as necessidades dos utilizadores, as suas preferências, domínios e capacidades dentro de um ambiente de visualização de realidade mista, recorrendo a dispositivos como uma mesa estereoscópica ou uns óculos de realidade virtual (subtarefa 1.3).

A tarefa Análise de Requisitos começou com uma reunião de arranque do projecto e a equipa de investigação definiu o procedimento exacto a ser usado, onde as tradicionais técnicas de análise de tarefas relativas à Interacção Homem-Computador serão usadas para reunir as informações relevantes dos utilizadores-alvo, os quais são arquitetos. As informações em questão incluem o perfil dos utilizadores, a análise do fluxo de trabalho do projecto de arquitectura, a observação dos utilizadores-tipo ao executar tarefas específicas como a modelação 3D, a análise de softwares de modelação 3D e a criação de maquetes físicas. Serão também realizadas uma série de entrevistas com utilizadores finais, bem como questionários a um conjunto alargado de profissionais de arquitectura. A análise incluirá ainda os requisitos do utilizador-tipo, o seu desempenho e as suas recomendações, bem como um conjunto de metas métricas a serem avaliadas durante a tarefa final do projecto Tecton 3D, a qual consiste na avaliação, pelo utilizador, do sistema criado.

Da tarefa Análise de Requisitos resultará um relatório técnico contendo uma análise detalhada do possível uso e cenários de realidade mista no fluxo de trabalho do projecto de arquitectura, destacando os operadores de modelação e de edição que deverão proporcionar mais benefícios aos arquitectos, ao criarem ou ao reverem um modelo virtual com os clientes, com as equipas de especialidades ou com outros arquitectos. Além disso, será analisada a possibilidade de modelação procedimental usando gramáticas da forma para criar ou editar novos edifícios durante a fase de modelação 3D, em comparação com as ferramentas de CAD existentes, utilizadas durante a fase conceptual de uma proposta de projecto de arquitectura. No que diz respeito à interacção, esta tarefa irá identificar o cenário do utilizador (a interface gráfica) e as metáforas de interacção mais adequadas às necessidades dos arquitectos.

### **Análise de Softwares de Modelação 3D**

No âmbito da sub-tarefa 1.1, descrita no capítulo anterior e designada por "Identificar os benefícios da realidade mista e as necessidades do utilizador no campo da arquitectura, considerando o seu fluxo de trabalho", foram estabelecidas as seguintes actividades:

- Análise de Softwares de Modelação 3D
- Inquérito online a utilizadores-alvo (Arquitectos)
- Entrevista e Acompanhamento de escritórios de arquitectura
- Inquérito à utilização de uma mesa para Modelação e Visualização 3D em Realidade Mista

O presente capítulo diz respeito à actividade "Análise de Softwares de Modelação 3D", onde foram analisados alguns softwares de modelação tridimensional, de acordo com dois critérios: aqueles que são mais utilizados no campo da Arquitectura e aqueles que têm características específicas que se entendem como úteis para o projecto Tecton 3D. Foram escolhidos para análise os softwares AutoCad (Autodesk), 3D Studio Max Design (Autodesk), Project Shapeshifter (Autodesk), Revit (Autodesk), ArchiCad (Graphisoft), SketchUp (Trimble), Rhinoceros (McNeel), Microstation (Bentley), City Engine (ArcGis), Sculptor (Instituto Federal de Tecnologia da ETH Zurich) e Vectorworks (Nemetschek). As características analisadas foram:

- 1.Paradigmas de Modelação (Modelação Básica, Modelação Paramétrica, Modelação Procedimental)
- 2.Processo de Criação do Modelo 3D (Criação de Sólidos Básicos, Criação de Sólidos e Superfícies através de Operações Booleanas, Criação de Sólidos e Superfícies através da Translação, Rotação e Interpolação de Perfis)
- 3.Instrumentos para a Criação e Edição do Modelo 3D (Menus textuais com ou sem ícones gráficos, Barras de Ferramentas com ícones gráficos, Barra de comandos alfanuméricos, Painéis de Criação e Edição alfanuméricos com ou sem ícones gráficos)
- 4.Características de Visualização (Visualização Exterior e Visualização Interior do Modelo 3D)

5.Tipo de Elementos Produzidos (Desenhos Rigorosos, Imagens Conceptuais ou Fotorealistas, Vídeos de Animação)

6.Áreas de Aplicação (Arquitectura, Urbanismo, Design)

7.Outras Características (Building Information Model, Análise Estrutural/Térmica/Energética, Imersão em Ambiente de Realidade Virtual)

	AutoCad	3D Studio Max Design	Project Shapeshifter	Revit	ArchiCad
<b>Modeling Paradigms</b>					
<u>Basic Modeling</u>	✓	✓		✓	✓
<u>Parametric Modeling</u>			✓		
<u>Procedural Modeling (Algorithms/Shape Grammars)</u>					

Fig. 3 – Paradigmas de Modelação dos Softwares analisados – Parte 1

	SketchUp	Rhinoceros	Microstation	City Engine	Sculptor	Vectorworks
<b>Modeling Paradigms</b>						
<u>Basic Modeling</u>	✓	✓	✓		✓	✓
<u>Parametric Modeling</u>			✓			
<u>Procedural Modeling (Algorithms/Shape Grammars)</u>			✓	✓		

Fig. 4 – Paradigmas de Modelação dos Softwares analisados – Parte 2

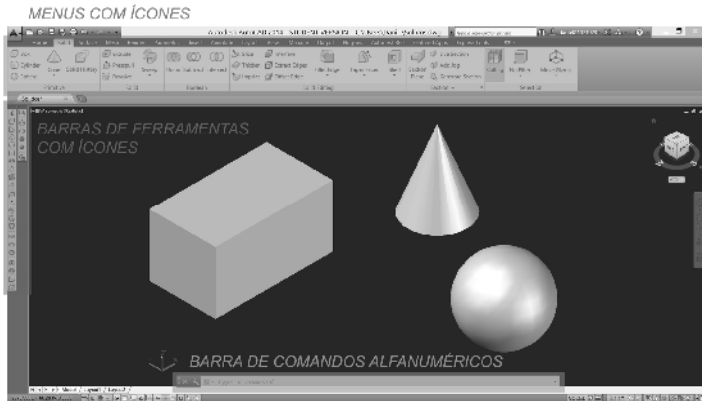


Fig. 5 – Interface gráfico do software AutoCad com os respectivos Instrumentos para a Criação e Edição do Modelo 3D

## Conclusões

Em forma de conclusão, foram identificados nos softwares analisados os seguintes pontos fortes e pontos fracos mais significativos:

- Pontos Fortes:

1. Softwares com boas capacidades de Modelação Básica, alguns deles com Modelação Paramétrica e poucos com Modelação Procedimental
2. Todos os processos de criação do Modelo 3D (Sólidos Primitivos, Operações Booleanas, Criação de Sólidos através da Translação, Rotação e Interpolação de Perfis, Criação de Malhas e Superfícies) são assegurados em muitos dos softwares
3. Diversidade de Instrumentos para a criação e edição do Modelo 3D
4. Softwares que produzem bons Desenhos Rigorosos, Imagens Conceptuais/Fotorealistas e Vídeos de Animação
5. Muitos softwares com aplicabilidade em Arquitectura e Design
6. Alguns softwares com boas características BIM e com boas Capacidades de Análise (Estrutural/Térmica/Energética/Outras)

- Pontos Fracos:

1. A maioria dos softwares foram idealizados e concebidos para funcionar através de um sistema que envolve o computador (para processamento de operações), o monitor (para visualização gráfica) e o rato, touchpad e teclado (para introdução pelo utilizador de comandos e dados), verificando-se um certo distanciamento entre o utilizador e o ambiente virtual de modelação e visualização tridimensional. O utilizador interage com o ambiente de modelação e visualização através de dispositivos intermédios (rato, touchpad, teclado), visualizando as suas acções e o resultado das mesmas num monitor que apresenta fisicamente imagens a duas dimensões, mas que tem a capacidade de simular a apresentação virtual de imagens a três dimensões. Dos softwares analisados, apenas o "Sculptor" (software protótipo desenvolvido pela ETH Zurich) prevê um ambiente virtual imersivo de modelação e visualização tridimensional, onde é possível ao utilizador modelar e visualizar no espaço os objectos e os espaços que concebe, permitindo inclusive experimentá-los e experienciá-los. Trata-se de um sistema mais interactivo e apelativo para o utilizador, na medida em que este interage directamente com os objectos e os espaços que cria e visualiza.
2. Modelação Procedimental existente em poucos softwares. No caso da modelação procedimental por gramáticas da forma, apenas se encontrou o software City Engine. Encontra-se em desenvolvimento um módulo de gramáticas da forma para o software SketchUp
3. Apenas o City Engine oferece aplicabilidade em Urbanismo, mas as suas capacidades são limitadas

Estes Pontos Fortes e Pontos Fracos servirão como dados para as seguintes tarefas e subtarefas do projecto Tecton 3D. Acreditamos que o mesmo terá um impacto significativo sobre os arquitetos, no que diz respeito

ao uso de ambientes de realidade virtual e de realidade mista para modelar tridimensionalmente, tendo mesmo num âmbito mais alargado influência quer no modo como os arquitectos desenvolvem os seus projectos, quer no modo como os analisam, apresentam e debatem com os clientes e com as equipas de especialidades, tornando todo o processo de trabalho mais estimulante, interactivo e eficiente.

### **Bibliografia**

ARAÚJO, B., JORGE, J., DUARTE, J.: 2012, ***Combining Virtual Environments and Direct Manipulation for Architectural Modeling***, eCAADe 2012, Praga, República Checa, Volume 2, pp. 409-418;

STINY, G.: 1980, ***Introduction to shape and shape grammars***, Environment and Planning B: Planning and Design 7, 343-351;

GIL, J., DUARTE, J.: 2012, ***Tools for evaluating the sustainability of urban design: a review***, Urban Design and Planning, Volume 165, Number 3, pp. 1-15.

