

UNIVERSIDADE DE LISBOA
FACULDADE DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOGRÁFICA, GEOFÍSICA E ENERGIA



Ciências
ULisboa

**Edifícios de escritórios de baixas necessidades de energia –
Contributo da arquitetura e soluções passivas para soluções de
custo-ótimo**

Ana Laura Carvalho

Mestrado Integrado em Engenharia da Energia e do Ambiente

Dissertação orientada por:
Doutor Armando Teófilo dos Santos Pinto (LNEC)
Professor Doutor Fernando Vítor Marques da Silva (FCUL/LNEC)

2017

Agradecimentos

Ao Doutor Armando Pinto, orientador da dissertação, pela oportunidade de desenvolver este trabalho, disponibilidade, paciência, esclarecimentos e conselhos, e sobretudo pela confiança depositada no meu trabalho. Um muito obrigada pelo acompanhamento ao longo destes meses, e por todo o apoio prestado em todas as fases da investigação.

Ao Professor Doutor Fernando Marques da Silva, co-orientador desta dissertação, pela oportunidade de desenvolver esta investigação, pelos esclarecimentos e conselhos, e revisão sempre pertinente do trabalho desenvolvido. Um obrigada pela sua influência como profissional e professor na construção do meu percurso académico.

Aos meus pais e irmã, porque sem eles nunca teria chegado aqui. Obrigada pela oportunidade de usufruir de uma educação de ensino superior, pela vossa luta para que nada me faltasse, pela educação e valores transmitidos, por acreditarem e confiarem em mim e no meu trabalho incondicionalmente. Em especial, um Obrigada ao meu Pai que infelizmente não viveu para conseguir ver o final do meu percurso académico, por fazer de mim um melhor ser humano e profissional, por me dar todas as condições para que hoje terminasse a minha educação do modo que desejei.

Ao Rafael, por todo o companheirismo ao longo destes cinco anos, por todo o apoio nos bons e maus momentos, pela paciência, ensinamentos, dedicação e amor, que permitiu a minha evolução pessoal e profissional.

Por último, mas não menos importante, a todos os colegas que ganhei na FCUL ao longo destes cinco anos. Obrigada pelos momentos de convívio e de camaradagem, e todos os momentos inesquecíveis partilhados, no fundo por tornarem esta fase da minha vida tão rica e divertida. Em especial, um agradecimento à Amélia, à Inês, à Natacha, ao Rama, ao Omar e ao Márcio por todos os anos que convivemos, por toda amizade e pelo contributo que deram em tornarem esta uma das melhores fases da minha vida.

Resumo

Os edifícios de elevado desempenho energético apresentam-se como o maior desafio no setor da eficiência energética das próximas décadas. No âmbito da diretiva europeia para um aumento do desempenho energético das construções, é necessário que os Estados-Membros da União Europeia realizem estudos de níveis ótimos de rentabilidade dos requisitos mínimos de desempenho energético dos edifícios. Nesta vertente, são utilizados edifícios de referência para esses estudos, devendo existir a preocupação com escolhas acertadas ao nível da combinação das opções arquitetónicas e de envolvente dos modelos de edifícios de referência, com o objetivo de se obterem soluções ótimas que melhorem o desempenho energético pelo menor custo global.

Na presente dissertação é efetuado um estudo de avaliação do impacto que as soluções passivas de edifícios de escritórios, ao nível da arquitetura e qualidade térmica da envolvente, apresentam na avaliação da eficiência energética dos mesmos e nas soluções de custo-ótimo. O estudo é realizado considerando duas localizações distintas na Europa (Helsínquia e Lisboa), pretendendo-se contribuir para a definição da arquitetura do edifício de escritórios de referência europeu que conduz ao alcance dos níveis mínimos de energia, em alternativa às soluções base de edifícios prismáticos dos estudos realizados até agora. Na análise de sensibilidade foram adotadas duas opções: uma análise comparativa e outra pela aplicação dos métodos de regressão e de Morris.

O presente estudo permitiu concluir que o parâmetro da arquitetura mais importante é o fator de forma que apresenta um peso de 80% na variação do desempenho energético, face a outros fatores geométricos e de qualidade térmica da envolvente. Igualmente verificou-se que as variáveis de iluminação, equipamentos elétricos e fração de vão envidraçado da envolvente são responsáveis por uma elevada proporção das necessidades de energia primária das construções, correspondendo a cerca de 30%, 50% e 10% do consumo energético dos modelos estudados.

Conclui-se que os níveis mínimos de energia, em Helsínquia correspondem a necessidades de energia primária de 52 kWh_{EP}/m².ano e em Lisboa a 62 kWh_{EP}/m².ano, diferindo em aproximadamente 70% em relação aos resultados verificados nos modelos de edifícios apresentados nos relatórios europeus. No que diz respeito ao nível de custo-ótimo, foi obtido um valor de 182 €/m² para Helsínquia e de 183 €/m² para Lisboa, com necessidades de energia primária de 60 kWh_{EP}/m².ano e 74 kWh_{EP}/m².ano, respetivamente.

Para validar as soluções de níveis mínimos de energia, preconiza-se que o modelo de edifícios de escritório europeu corresponda assim a um modelo com um fator de forma inferior a 0.20, um valor de fração de vão envidraçada (WWR) de 10% em Helsínquia e 80% em Lisboa e uma minimização dos valores de coeficientes de transferência de calor da envolvente opaca e envidraçada e das componentes de ganhos internos (iluminação, equipamentos elétricos e ocupação). Estes modelos deverão apresentar sistemas de controlo de iluminação natural, dispositivos de sombreamento, uma estratégia de ventilação natural e sistemas energéticos de climatização de elevada eficiência.

Em suma, considera-se que a tipologia de edifícios de escritórios de referência do presente estudo permite definir novas fronteiras para o desempenho energético dos edifícios europeus, e ainda, contribuir para as soluções de componentes das construções que permitirão otimizar a eficiência energética do setor.

Palavras-Chave: edifícios de escritórios, custo-ótimo, arquitetura, desempenho energético, análise de sensibilidade, EnergyPlus.

Abstract

High energy performance buildings are the biggest challenge in the energy efficiency sector in the coming decades. Within the framework of the European Directive for an increase in the energy performance of buildings, it is necessary for Member States of the European Union to carry out studies of optimum levels of profitability of the minimum energy performance requirements of buildings. In this aspect, reference buildings are used for these studies, and there should be a concern with the right choices in terms of the combination of the architectural and envelope options of reference building models to obtain optimal solutions that improve energy performance through lower overall cost.

In the present dissertation, a study is carried out to evaluate the impact of passive solutions of office buildings, in terms of the architecture and the thermal quality of the envelope, in the evaluation of their energy efficiency and cost-optimal solutions. The study is carried out considering two distinct locations in Europe (Helsinki and Lisbon), aiming to contribute to the definition of European office building architecture leading to the achievement of minimum energy levels as an alternative to base solutions of prismatic buildings of studies carried out so far. For the sensitivity analysis two options were adopted: a comparative analysis and another by the application of the regression and Morris methods.

The present study allowed to conclude that the parameter of the most important architecture is the form factor that presents a weight of 80% in the energetic performance variation, in relation to other geometric factors and thermal quality of the envelope. It was also verified that the variables of lighting, electrical equipment and glass enclosure fraction are responsible for a high proportion of the primary energy needs of the buildings, corresponding to about 30%, 50% and 10% of the energy consumption of the models studied.

It was found that at the Helsinki location the minimum energy levels correspond to a primary energy requirement of 52 kWh_{EP}/m².year, where as in Lisbon it corresponds to a requirement of 62 kWh_{EP}/m².year, differing by approximately 70% from the results found in the building models presented in the European reports. Regarding the cost-optimal level, this presents a value of 182 €/m² for Helsinki and 183 €/m² for Lisbon, with primary energy needs of 60 kWh_{EP}/m².year and 74 kWh_{EP}/m².year, respectively.

It is recommended that the model of European office buildings should correspond to a model with a form factor of less than 0.20, a glass-enclosed fraction (WWR) of 10% in Helsinki and 80% in Lisbon, a minimization of the values of heat transfer coefficient of the opaque and glazed envelope and the internal gains components (lighting, electrical equipment and occupation). These models should feature natural lighting control systems, shading devices, a natural ventilation strategy and air-conditioning systems of high efficiency.

In short, the typology of reference office buildings in the present study allows us to define new frontiers for the energy performance of European buildings, as well as contributing to the solutions of building components that will optimize the energy efficiency of the sector.

Keywords: office buildings, optimal-cost, architecture, energy performance, sensitivity analysis, EnergyPlus.

Índice

Agradecimentos	iii
Resumo	v
Abstract	vii
Índice de Figuras	xiii
Índice de Tabelas	xv
Acrónimos	xvii
Simbologia e Notações.....	xix
1. Capítulo 1 – Introdução	1
1.1. Enquadramento Geral	1
1.2. Objetivo	3
1.3. Estrutura da dissertação	4
1.4. Metodologia	4
2. Capítulo 2 - Estado da arte.....	7
2.1. Enquadramento regulamentar e normativo	7
2.1.1 Diretiva 2010/31/EU.....	7
2.1.2 Regulamento delegado N.º 244/2012 e diretrizes	8
2.1.3. Edifícios de elevado desempenho energético (nZEB)	9
2.2. Edifício de referência.....	11
3. Capítulo 3 - Desempenho energético de edifícios: Fatores.....	13
3.1. Teoria de transferência de calor dinâmica	13
3.2. Aspectos relevantes na construção solar passiva	15
3.2.1. Localização geográfica – Orientação e condições climáticas.....	16
3.2.2. Características geométricas	17
3.2.2.1. Fator de forma e compactacidade	17
3.2.2.2. Window-to-Wall ratio (WWR)	18
3.2.3. Ganhos solares e iluminação natural.....	18
3.2.3.2 Fator solar do vidro (g).....	18
3.2.3.3 Iluminância	19
3.2.4. Características da envolvente	19
3.2.4.1. Envolvente opaca	19
3.2.4.2. Vãos envidraçados	20
3.3. Sistemas energéticos.....	20
3.3.1. Chiller/Bomba de calor	21
3.4. Indicadores de desempenho energético para identificação de soluções de custo-ótimo... 21	

4.	Capítulo 4 – Métodos de análise de sensibilidade.....	25
4.1.	Método Local	25
4.2.	Método de Regressão.....	26
4.3.	Método de Morris	28
4.4.	Métodos ‘variance-based’ e ‘meta-modelling’	29
5.	Capítulo 5 – Apresentação e discussão de resultados.....	31
5.1.	Aspetos gerais	31
5.2.	Edifícios de escritórios europeus: Caracterização dos aspetos de arquitetura.....	31
5.2.1.	Aspetos gerais.....	31
5.2.2.	Método 1 – “Edifício Teórico”	31
5.2.3.	Método 2 – “Edifício Exemplo”	37
5.2.3.1.	Modelos de edifícios em forma de átrio	37
5.2.4.	Método 3 – “Edifício Real”	40
5.2.5.	Notas conclusivas	41
5.3.	Aspetos gerais do estudo de simulação.....	42
5.3.1.	Geometria – Localização e orientação	43
5.3.2.	Envolvente.....	45
5.3.3.	Sistemas energéticos	46
5.3.4.	Operação	48
5.4.	Análise detalhada da Geometria 2.....	48
5.4.1.	Caso de estudo	48
5.4.2.	Análise de sensibilidade	49
5.4.3.	Soluções de custo-ótimo	60
5.5.	Análise de sensibilidade das restantes geometrias.....	63
5.5.1.	Caso de estudo	64
5.5.2.	Análise de sensibilidade	64
5.5.2.1.	Método de Regressão - Índice de PCC.....	64
5.5.2.2.	Método de Morris.....	67
5.5.3.	Soluções de custo-ótimo	73
6.	Capítulo 6 – Conclusões	77
	Referências Bibliográficas	81
A.	Anexos.....	87
	Anexo A – Síntese dos edifícios de elevado desempenho energético.....	87
	Anexo B – Custo global dos componentes dos edifícios	89
	Anexo C – Parâmetros de simulação	93
	Anexo D – Índices de PCC.....	96

Anexo E – Índices obtidos no método de Morris.....97

Índice de Figuras

Figura 1.1: Consumo de energia final por setor na UE, 2014 [1].	1
Figura 1.2: Fraccionamento da área de pavimento útil do setor dos edifícios na EU com particularização do setor de edifícios não-residenciais [7].	2
Figura 1.3: Metodologia geral adotada.	6
Figura 2.1: Metodologia para estudos de níveis ótimos de rentabilidade de medidas de eficiência energética [15].	9
Figura 2.2: Balanço energético esperado de um edifício nZEB ou ZEB [16].	9
Figura 2.3: Esquematização das componentes fulcrais na conceção de um edifício de referência [23].	12
Figura 3.1: Representação esquemática da dinâmica dos processos de transferência de calor num edifício [31].	15
Figura 4.1: Métodos globais de SA.	25
Figura 4.2: Metodologia geral de aplicação dos métodos de SA em modelos de desempenho energético de edifícios.	30
Figura 5.1: Variação de FF e WWR dos edifícios de referência de escritórios apresentados nos relatórios nacionais no âmbito da EPBD, com os respetivos valores de $GD_{aquecimento}$ de cada localização.	32
Figura 5.2: Variação do valor de U_{global} da envolvente opaca dos edifícios de referência de escritórios apresentados nos relatórios nacionais no âmbito da EPBD, com os respetivos valores de $GD_{aquecimento}$ de cada localização.	33
Figura 5.3: Variação do valor de IEE dos modelos de edifícios de referência de escritórios apresentados nos relatórios nacionais no âmbito da EPBD.	34
Figura 5.4: Modelos de edifícios teóricos – Geometria 1 (FF = 0.12) (Em cima, à esquerda), Geometria 2 (FF = 0.23) (Em cima, à direita) e Geometria 3 (FF = 0.35) (Em baixo, ao centro) [92].	36
Figura 5.5: Geometria em forma de polígono (à esquerda) [48] e geometria em forma de átrio (à direita) [85].	37
Figura 5.6: Geometrias em forma de átrio [90].	38
Figura 5.7: Modelo de edifício em forma de átrio 1 (FF = 0.23) – GA1 da Tabela 5.2 [92].	40
Figura 5.8: Modelo de edifício em forma de átrio 2 (FF = 0.23) - GA2 da Tabela 5.2 [92].	40
Figura 5.9: Edifícios reais analisados – 1: Edifício A do Campus da Justiça; 2 – Edifício de gestão do Parque das Nações; 3- Edifício Sede da Vodafone – Parque das Nações (GoogleEarth).	41
Figura 5.10: Variação de temperatura anual nas duas localizações em estudo: Helsínquia, Finlândia e Lisboa, Portugal. [Fonte: ficheiro climático EnergyPlus [9]].	44
Figura 5.11: Mapa de Köppen-Geiger na zona da Europa e legenda da classificação climática [94].	45
Figura 5.12: Variação do valor de U das soluções construtivas das superfícies opacas em função da variação da espessura de isolamento das mesmas.	46
Figura 5.13: Funcionamento do sistema HVAC com a estratégia de ventilação natural, na semana de 3 a 7 de Julho, na localização de Lisboa.	47
Figura 5.14: Soluções obtidas para as variáveis em estudo para a localização de Helsínquia na situação de ventilação mecânica. A verde a solução de energia mínima e a vermelho a solução de custo-ótimo.	53
Figura 5.15: Soluções obtidas para as variáveis em estudo para a localização de Lisboa na situação de ventilação mecânica. A verde a solução de energia mínima e a vermelho a solução de custo-ótimo.	54
Figura 5.16: Influência da aplicação de SE ou SI, nas localizações de Helsínquia (à esquerda) e Lisboa (à direita). O conjunto das soluções apresentadas corresponde a uma situação de GI altos, iluminação CFL e VM. A verde a solução de energia mínima e a vermelho a solução de custo-ótimo.	55

Figura 5.17: Variação do valor de U_{global} da envolvente opaca com as necessidades de energia primária. A presente situação corresponde à aplicação no modelo de simulação para as duas localizações das condições de VM, SE, GI baixos, iluminação LED e WWR = 40%.	56
Figura 5.18: Influência do tipo de vão envidraçado aplicado nas localizações de Helsínquia e Lisboa. Esta situação corresponde à aplicação no modelo de simulação das condições de VM, SE, GI altos e iluminação CFL.	57
Figura 5.19: Influência da absorvância das superfícies exteriores – parede exterior e cobertura – nas localizações de Helsínquia e Lisboa. Esta situação corresponde à aplicação no modelo de simulação das condições de VM, SE, GI altos, iluminação CFL e WWR = 40 %.	58
Figura 5.20: Influência da variação de RPH na situação de VH e SE para as soluções de energia mínima e custo-ótimo nas duas localizações em estudo.	59
Figura 5.21: Comparação das necessidades de energia primária nas diferentes componentes de uso do edifício para a melhor solução a nível de energia mínima (Tabela 5.5) e custo-ótimo (Tabela 5.9) nas duas localizações em estudo. 1 – Solução de VH (2RPH), SE, GI baixos, iluminação LED e WWR = 10%; 2 – Solução de VH (2RPH), SE, GI baixos, iluminação CFL e WWR = 10%; 3 – Solução de VH (2RPH), SE, GI baixos, iluminação LED e WWR = 80%; 4 - Solução de VH (2RPH), SE, GI baixos, iluminação CFL e WWR = 10%.	60
Figura 5.22: Valores de índices de PCC obtidos para a situação de VM e VH nas duas localizações em estudo.	65
Figura 5.23: Valores de índices de PCC obtidos para a situação de VM, nas duas localizações em estudo para os três FF em estudo.	66
Figura 5.24: Valores de índices de PCC obtidos para a situação de VH nas duas localizações em estudo para os três FF em estudo.	67
Figura 5.25: Índices obtidos pelo método de Morris para análise de sensibilidade da importância das variáveis em estudo, nas situações de VM e VH nas localizações de Helsínquia (à verde) e Lisboa (à amarelo).	68
Figura 5.26: Classificação da importância dos parâmetros em estudo segundo o método de Morris para os três valores de FF em variação na situação de VM para as duas localizações.	69
Figura 5.27: Classificação da importância dos parâmetros em estudo segundo o método de Morris para os três valores de FF em variação, na situação de VH para as duas localizações.	70
Figura 5.28: Comparação das necessidades de energia primária nas diferentes componentes de uso do edifício, para a melhor solução a nível de energia mínima (coluna à esquerda do par) (Tabela 5.11) e custo-ótimo (coluna à direita do par) (Tabela 5.12) das três geometrias (G1, G2 e G3) com variação do parâmetro FF, nas duas localizações em estudo.	74
Figura 5.29: Comparação das necessidades de energia primária nas diferentes componentes de uso do edifício, para a melhor solução a nível de energia mínima (Tabela 5.11) e custo-ótimo (Tabela 5.12) nos modelos G2 e modelos de edifícios átrios correspondentes, nas duas localizações em estudo.	75

Índice de Tabelas

Tabela 4.1: Índices de sensibilidade associados ao método de regressão e sua descrição.	26
Tabela 5.1: Características geométricas dos modelos de edifícios mais comuns retirados dos relatórios nacionais no âmbito da EPBD.	35
Tabela 5.2: Características geométricas dos edifícios exemplo com geometria em forma de átrio.	39
Tabela 5.3: Parâmetros em estudo nos casos de estudo apresentados.	43
Tabela 5.4: Soluções de energia mínima na situação de ventilação mecânica nas duas localizações de estudo.	50
Tabela 5.5: Soluções de energia mínima na situação de ventilação híbrida nas duas localizações de estudo.	51
Tabela 5.6: Síntese do impacto das variáveis acima analisadas nas necessidades de energia primária do modelo em estudo.	58
Tabela 5.7: Síntese das melhores soluções de energia mínima obtidas na análise deste modelo. As soluções apresentadas correspondem a uma situação de VH com 2 RPH.	60
Tabela 5.8: Soluções de custo-ótimo na situação de ventilação mecânica nas duas localizações em estudo.	61
Tabela 5.9: Soluções de custo-ótimo na situação de ventilação híbrida nas duas localizações em estudo.	62
Tabela 5.10: Síntese das melhores soluções de custo-ótimo obtidas na análise deste modelo. As soluções apresentadas correspondem a uma situação de VH com 2 RPH.	63
Tabela 5.11: Soluções de energia mínima para os cinco casos de estudo, na localização de Helsínquia e Lisboa, extrapoladas pelo método de Morris para SA.	71
Tabela 5.12: Soluções de custo-ótimo para os cinco casos de estudo, na localização de Helsínquia e Lisboa extrapoladas pelo método de Morris para SA.	73
Tabela 5.13: Impacto nas necessidades de energia primária das melhores soluções de energia mínima e custo-ótimo evidenciadas na Tabela 5.6 e Tabela 5.7 para a análise de sensibilidade detalhada do modelo de edifício G2 (FF= 0.23) da secção 5.4.2, face ao valor de IEE médio ($175 \text{ kWh}_{EP}/\text{m}^2 \cdot \text{ano}$) dos relatórios dos EM realizados no âmbito da diretiva.	75
Tabela 5.14: Impacto nas necessidades de energia primária das melhores soluções de energia mínima e custo-ótimo evidenciadas na Tabela 5.11 e Tabela 5.12 para a análise de sensibilidade efetuado pelo método de Morris na secção 5.5.2.2, face ao valor de IEE médio ($175 \text{ kWh}_{EP}/\text{m}^2 \cdot \text{ano}$) dos relatórios dos EM realizados no âmbito da diretiva.	76
Tabela A.1: Dados construtivos e energéticos dos edifícios de elevado desempenho energético [22].	87
Tabela A.2: Síntese das soluções arquitetónicas e de eficiência energética dos edifícios analisados na Tabela A.1 [22].	88
Tabela A.3: Soluções construtivas das superfícies opacas aplicadas aos modelos de edifícios em estudo.	89
Tabela A.4: Custo económico das superfícies da envolvente opaca consideradas no presente estudo [102].	89
Tabela A.5: Custo económico das soluções construtivas de vãos envidraçados aplicado para obtenção das soluções apresentadas na secção 5.4 [102].	90
Tabela A.6: Custo económico das soluções construtivas de vãos envidraçados aplicado para obtenção das soluções apresentadas na secção 5.5 [102].	90
Tabela A.7: Custo económico das soluções de sombreamento dos vãos envidraçados considerados para obtenção das soluções apresentadas na secção 5.4 e secção 5.5 [102].	90

Tabela A.8: Custo económico das soluções de iluminação consideradas para obtenção das soluções apresentadas na secção 5.4 e secção 5.5 [102].	91
Tabela A.9: Custo económico das soluções de sistemas de ventilação consideradas para obtenção das soluções apresentadas na secção 5.4 e secção 5.5 [102].	91
Tabela A.10: Custo de energia elétrica [103] e emissão de gases de efeito estufa [14], para as duas localizações do estudo, no período de cálculo considerado, para obtenção do custo global das soluções apresentadas na secção 5.4 e secção 5.5.....	92
Tabela A.11: Valores de infiltração considerados para os vãos envidraçados dos modelos em estudo, calculados com base na informação de [95].	93
Tabela A.12: Valores de caudal mínimo de ar novo aplicados aos modelos em estudo, calculados a partir de [96].	93
Tabela A.13: Dimensionamento da iluminação artificial nos modelos de edifícios em estudo [98].	93
Tabela A.14: Perfil horário de ocupação dos espaços de escritórios aplicados nos modelos em estudo [97].	94
Tabela A.15: Perfil horário de utilização de iluminação aplicado aos modelos em estudo [97].	94
Tabela A.16: Perfil horário de utilização dos equipamentos elétricos aplicados aos modelos em estudo [97].	95
Tabela A.17: Valores de índices de PCC obtidos para a análise de SA da secção 5.5.2.1 para a situação de VM e VH nas duas localizações em estudo.	96
Tabela A.18: Valores de índices de PCC obtidos para a análise de SA da secção 5.5.2.1 na situação de VM para as duas localizações em estudo e os três modelos de edifícios com variação de FF.	96
Tabela A.19: Valores de índices de PCC obtidos para a análise de SA da secção 5.5.2.1 na situação de VH para as duas localizações em estudo e os três modelos de edifícios com variação de FF.....	96
Tabela A.20: Classificação por ordem de importância dos índices do método de Morris obtidos para a análise de SA da secção 5.5.2.2 na situação de VM e VH para as duas localizações em estudo.	97
Tabela A.21: Classificação por ordem de importância dos índices do método de Morris obtidos para a análise de SA da secção 5.5.2.2 na situação de VM para as duas localizações em estudo, e os três modelos de edifícios com variação de FF.	97
Tabela A.22: Classificação por ordem de importância dos índices do método de Morris obtidos para a análise de SA da secção 5.5.2.2 na situação de VH para as duas localizações em estudo, e os três modelos de edifícios com variação de FF.	97

Acrónimos

GEE	Gases de Efeito de Estufa
UE	União Europeia
EM	Estado-Membro
ER	Edifício de Referência
EPBD	Energy Performance of Buildings Directive
NZEB	Net Zero Energy Building
ZEB	Zero Energy Building
FER	Fonte de Energia Renovável
RECS	Regulamento de Edifícios de Comércio e Serviços
VAL	Valor Atual Líquido
SA	Análise de Sensibilidade (<i>Sensitive Analysis</i>)
PEAR	Pearson Product Moment Correlation Coefficient
SRC	Standardized Regression Coefficient
PCC	Partial Correlation Coefficient
SPEA	Spearman Coefficient
SRCC	Standardized Rank Regression Coefficient
PRCC	Partial Rank Correlation Coefficients
EUA	Estados Unidos da América
FAST	Fourier Amplitude Sensitivity Test
MARS	Multivariate Adaptive Regression Splines
ACOSSO	Adaptive Component Selection and Smoothing Operator
SVM	Support Vector Machine
G1	Modelo de edifício ‘Geometria 1’
G2	Modelo de edifício ‘Geometria 2’
G3	Modelo de edifício ‘Geometria 3’
GA1	Modelo de edifício ‘Geometria Átrio 1’
GA2	Modelo de edifício ‘Geometria Átrio 2’
HEL	Helsínquia
LIS	Lisboa
BEL	Bélgica (<i>Belgium</i>)
CYP	Chipre (<i>Cyprus</i>)
DEN	Dinamarca (<i>Denmark</i>)
ESP	Espanha (<i>Spain</i>)
EST	Estónia (<i>Estonia</i>)
FIN	Finlândia (<i>Finland</i>)
IRL	Irlanda (<i>Ireland</i>)
ITA	Itália (<i>Italy</i>)
LAT	Letónia (<i>Latvia</i>)
LTU	Lituânia (<i>Lithuania</i>)
ROM	Roménia (<i>Romania</i>)
SLO	Eslováquia (<i>Slovakia</i>)
UK	Reino Unido (<i>United Kingdom</i>)
MAX	Máximo
MED	Média
MIN	Mínimo

XPS	Poliestireno extrudido (<i>Extruded polystyrene</i>)
EPS	Poliestireno expandido (<i>Expanded polystyrene</i>)
HVAC	Heating, Ventilation and Air-Conditioning
CFL	Compact Fluorescent Light
LED	Light-emitting diode
PE	Superfície Parede Exterior
COB	Superfície Cobertura
PAV	Superfície Pavimento
GI	Ganhos Internos
EE	Equipamentos Elétricos
SE	Sombreamento Externo
SI	Sombreamento Interno
VM	Ventilação Mecânica
VH	Ventilação Híbrida
VN	Ventilação Natural
CO₂	Dióxido de Carbono

Simbologia e Notações

G_i	Ganhos internos num compartimento [W]
G_s	Ganhos solares num compartimento [W]
G_v	Ganhos de ventilação (infiltrações do ar exterior) [W]
G_c	Ganhos de carga sensível de climatização [W]
ρ	Massa volúmica [kg/m ³]
C_p	Calor específico [J/(kgK)]
V_s	Volume do compartimento [m ³]
A_n	Área da superfície n [m ²]
U_n	Coefficiente de transferência de calor entre o ar interior e a superfície n [W/(m ² K)]
T_i	Temperatura interior do compartimento [K]
T_{sn}	Temperatura da superfície [K]
G	Densidade do fluxo de calor no interior da superfície [W/m ²]
R_{si}	Resistência térmica superficial [(m ² K)/W]
T_{si}	Temperatura superficial interior [K]
T_{se}	Temperatura superficial exterior [K]
A_v	Área do vão envidraçado [m ²]
g	Fator solar do vidro [adimensional]
R_{direta}	Radiação solar direta incidente na superfície [W/m ²]
AT	Altitude [m]
AZ	Azimute [°]
$FfJC$	Fator de forma entre a janela e o céu [adimensional]
R_{difusa}	Radiação solar difusa [W/m ²]
Φ	Latitude [°]
Ψ	Longitude [°]
GD	Número de graus-dias, na base de 18 °C, correspondente à estação convencional de aquecimento [°C]
FF	Fator de Forma [m ⁻¹]
WWR	Window-to-Wall ratio [%]
DPI	Densidade de Potência de Iluminação [(W/m ²)/100lux]
COP	Coefficiente de Desempenho (Coefficient of Performance) [adimensional]
EER	Índice de Eficiência Energética (Energy Efficiency Rating) [adimensional]
$SCOP$	Coefficiente de Desempenho Sazonal (Seasonal Coefficient of Performance) [adimensional]
$SEER$	Índice de Eficiência Energética Sazonal (Seasonal Energy Efficiency Rating) [adimensional]
IEE	Indicador de Eficácia Energética [kWh/m ² .ano]
FC	Fator de conversão de energia primária [adimensional]
τ	Período de cálculo [anos]
$C_g(\tau)$	Custo global no período de cálculo τ (relativo ao ano inicial τ_0) [€/m ²]
C_i	Custo inicial de investimento para a medida ou conjunto de medidas [€/m ²]
$C_{a,i}(j)$	Custo anual no ano i para a medida ou conjunto de medidas j [€/m ²]

$V_{f,r}(j)$	Valor residual da medida ou conjunto de medidas j no final do período de cálculo [€/m ²]
$R_d(i)$	Fator de desconto no ano i , com base na taxa de desconto r [adimensional]
p	Número de anos do período de cálculo [anos]
r	Taxa de desconto real [%]
$C_{c,i}(j)$	Custo do carbono para a medida ou conjunto de medidas j durante o ano i [€]
SI	Índice de Sensibilidade (Sensitivity Index) [%]
U_{global}	Coefficiente de transferência de calor da envolvente opaca [W/(m ² K)]
$U_{vão}$	Coefficiente de transferência de calor do vão envidraçado [W/(m ² K)]
α_{sup}	Absortância das superfícies exteriores [adimensional]
$\tau_{vão}$	Transmitância do vão envidraçado [adimensional]
RPH	Renovação por hora [h ⁻¹]
isoPE	Isolamento da superfície Parede Exterior [m]
isoCOB	Isolamento da superfície Cobertura [m]
isoPAV	Isolamento da superfície Pavimento [m]

1. Capítulo 1 – Introdução

1.1. Enquadramento Geral

Nas últimas décadas, as sociedades sofreram profundas alterações na sua qualidade de vida devido ao desenvolvimento industrial, económico e tecnológico associado a um exponencial crescimento populacional. Consequentemente, verificou-se um aumento da exploração dos recursos naturais e da produção de bens de consumo em massa, resultando num incremento do consumo energético em todos os setores sociais.

Na atualidade, estima-se que os edifícios representem cerca de 40% do consumo total de energia e um terço das emissões de gases de efeito estufa (GEE) na União Europeia (UE), como verificado pela informação dada na Figura 1.1 pela Agência Europeia do Ambiente [1]. Deste modo, a UE desenvolveu um conjunto de políticas de forma a estimular um aumento do desempenho energético do setor em todos os seus Estados-Membros (EM). Estas políticas divulgadas sob a forma de diretivas vinculativas (*Energy Performance of Buildings Directive*, EPBD) permitiram um aumento na exigência energética do setor, e o cumprimento por parte da UE das metas propostas nos acordos internacionais [2], [3].

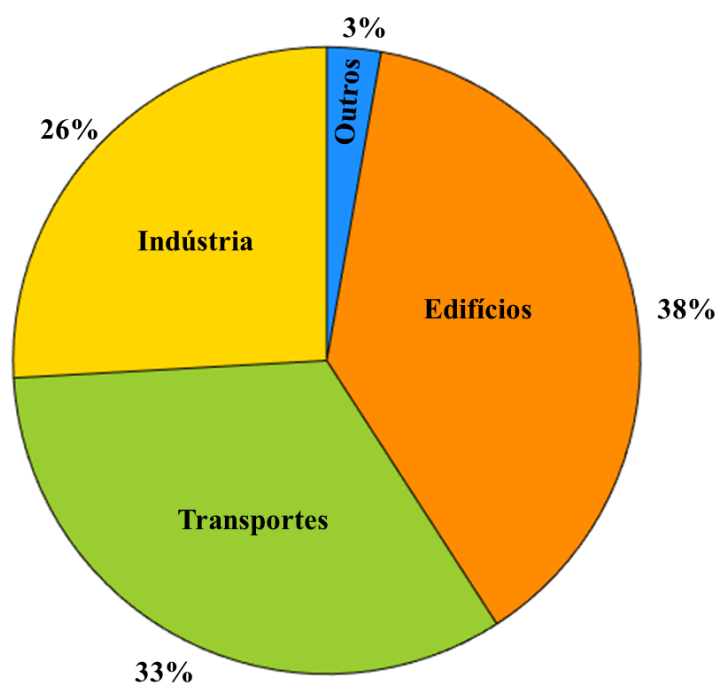


Figura 1.1: Consumo de energia final por setor na UE, 2014 [1].

A Diretiva 2010/31/EU requer que todos os seus EM assegurem níveis ótimos de rentabilidade para os requisitos mínimos de desempenho energético de edifícios, ou dos componentes do mesmo, que conduzam ao menor custo monetário durante o ciclo de vida económico estimado para a construção. Adicionalmente, este documento obriga que até ao fim do ano de 2020 todos os edifícios novos sejam edifícios com necessidades quase nulas de energia (nZEB), e que até ao fim de 2018, os edifícios novos ocupados ou detidos por entidades públicas sejam edifícios nZEB [4].

Na conceção de um edifício nZEB, que se pode definir genericamente como um edifício com elevado desempenho energético, com necessidades de energia muito baixas ou próximas de zero, sendo estas supridas por fontes de energia renováveis (FER) [4], importa refletir sobre a contribuição da arquitetura e da qualidade térmica da envolvente no desempenho energético da construção.

Há cerca de 30 anos, Lechner [5] discutiu como as decisões geométricas e de estrutura de um edifício podem afetar as necessidades energéticas do edifício, tendo concluído que quando este se encontra adequadamente dimensionado, pode ser obtida uma redução de aproximadamente 60% nas necessidades de aquecimento, arrefecimento e iluminação. Por sua vez, a utilização de fontes de energia renováveis, como métodos passivos de aquecimento, arrefecimento e de iluminação, podem incrementar o potencial de redução do consumo energético em 20% [6].

Nos dias de hoje, com o desenvolvimento de ferramentas de simulação energética em edifícios, de medidas de eficiências energética e de políticas públicas que atuam no sentido de se alcançar uma maior rentabilidade na dicotomia energia-custo no setor, as questões de arquitetura e qualidade térmica da envolvente tornaram-se vitais para a obtenção de edifícios sustentáveis e de baixas necessidades energéticas. Deste modo, é possível obter um elevado conforto térmico interior para os utilizadores da construção à custa de um baixo consumo energético.

Particularizando a realidade europeia sobre o setor de edifícios não-residenciais, estima-se que a tipologia de edifícios de escritórios represente cerca de 23% da área de pavimento útil da totalidade de edifícios não-residenciais no espaço europeu, segundo fonte do Building Performance Institute Europe [7], como apresentado na Figura 1.2. Igualmente nas informações disponibilizadas pelos EM no âmbito dos relatórios nacionais realizados pelo vínculo determinado na diretiva europeia [8], verifica-se que as geometrias mais preponderantes no estudo deste tipo de construções são edifícios prismáticos, que detém na generalidade, soluções arquitetónicas pouco adaptadas a soluções passivas ou sustentáveis, acrescentando uma dificuldade no alcance do objetivo nZEB.

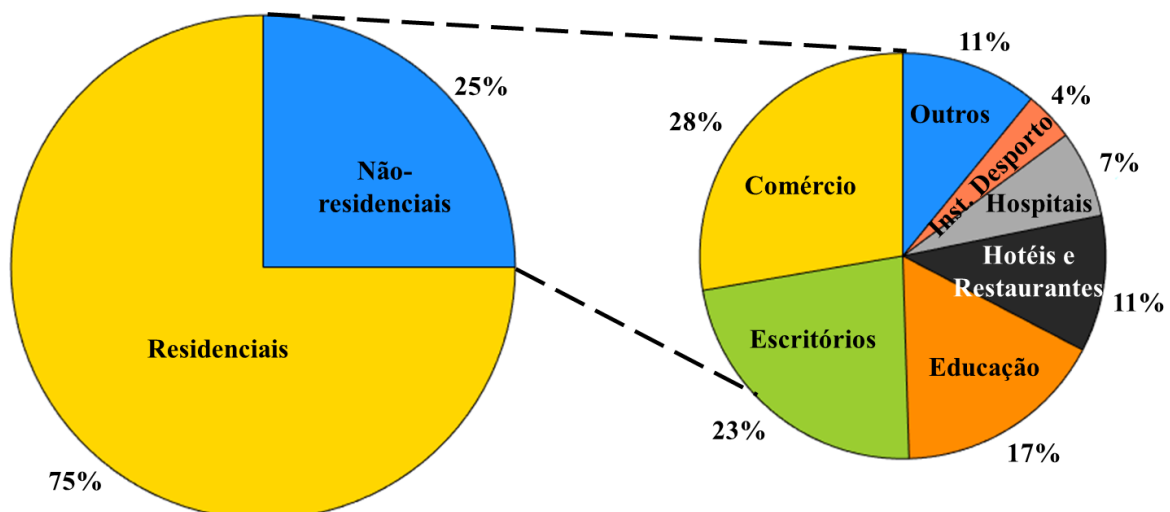


Figura 1.2: Fraccionamento da área de pavimento útil do setor dos edifícios na EU com particularização do setor de edifícios não-residenciais [7].

Deste modo, uma vez que se considera que os aspetos arquitetónicos apresentam um papel decisivo na otimização dos custos de ciclo de vida do edifício, o presente estudo pretende analisar a influência da arquitetura na tipologia de edifícios de escritórios a nível europeu, e identificar soluções passivas para soluções de custo-ótimo no âmbito da metodologia europeia para a eficiência energética do setor. Nas conclusões apresenta-se uma estimativa do impacto da arquitetura passiva face à arquitetura prismática no âmbito do presente estudo de custos-ótimos.

1.2. Objetivo

A presente dissertação tem como principal objetivo avaliar o impacto que os parâmetros de arquitetura e envolvente representam na avaliação da eficiência energética de edifícios e nas soluções custo-ótimas. Face aos resultados obtidos, perspetiva-se contribuir para a definição de edifício de referência europeu, e conseqüentemente para a definição de níveis ótimos de rentabilidade dos requisitos mínimos de desempenho energético dos edifícios.

No que diz respeito à definição de edifício nZEB, esta dissertação tentará contribuir para uma maior compreensão do que se poderá entender por edifícios com necessidades quase nulas de energia ou muito baixas, incorporando a variável de arquitetura que se encontra relativamente omissa nos estudos de níveis ótimos de rentabilidade dos relatórios europeus.

Tendo em consideração o anteriormente referido, a questão principal neste estudo traduz-se em:

No âmbito dos requisitos da diretiva 2010/31/EU, identificar qual a influência dos parâmetros de arquitetura e envolvente na definição do edifício de referência de escritórios, e no atingir dos níveis ótimos de rentabilidade dos requisitos mínimos de desempenho energético?

A resposta à questão proposta será conseguida pela definição de diversos modelos de edifícios, com a aplicação de três métodos distintos de caracterização de um ER (Edifício de Referência). São depois definidos indicadores da qualidade térmica da arquitetura e da envolvente. Com recurso a um modelo numérico de simulação energética de edifícios (EnergyPlus [9]), são determinadas as necessidades energéticas dos modelos em estudo. Por fim, é realizada uma análise de sensibilidade das soluções de energia mínima e de custo-ótimo nos casos de estudo considerados, podendo-se assim identificar as variáveis relevantes e quantificar o impacto das mesmas nos níveis ótimos de rentabilidade de medidas de eficiência energética.

Dada a extensão que um estudo de níveis ótimos de rentabilidade detém, é igualmente objetivo desta dissertação avaliar as diferenças obtidas nos resultados face aos tipos de análise de sensibilidade aplicados. Numa primeira fase do estudo recorre-se a análise do tipo paramétrica e subsequentemente serão aplicados dois métodos de análise de sensibilidade baseados em amostragem do tipo estatística. Com os resultados obtidos, é possível proceder a uma avaliação do impacto dos parâmetros de arquitetura solar passiva selecionados no estudo do desempenho energético dos edifícios, bem como, analisar as diferenças entre diferentes métodos de análise de sensibilidade. Por último, é efetuada uma seleção das soluções de energia mínima e de custo-ótimo.

Assim sendo surgiram algumas questões secundárias no decorrer deste estudo:

- Quais os aspetos dos parâmetros de forma e envolvente do edifício que afetam em maior grau o desempenho energético da edificação?
- Quais as soluções de edifícios da tipologia de escritórios mais relevantes para a otimização do seu custo-ótimo de ciclo de vida?
- Qual o melhor método para efetuar uma análise de sensibilidade das variáveis que afetam o desempenho energético dos edifícios em estudos de soluções de custo-ótimas?
- Qual a influência do diferente modo de definição do ER, em termos de arquitetura, no objetivo de alcance de construções do tipo nZEB, na tipologia de edifícios de escritórios?

1.3. Estrutura da dissertação

Para permitir uma resposta estruturada às questões mencionadas na secção anterior, a presente dissertação encontra-se organizada da seguinte forma:

- O presente capítulo (Capítulo 1) apresenta o enquadramento geral do setor energético, e da importância da componente dos edifícios, adicionado-se os principais objetivos deste estudo e o quadro metodológico que será seguido na presente dissertação;
- O Capítulo 2 introduz o estado do conhecimento deste estudo, abordando o seu enquadramento regulamentar a nível europeu, e as questões relativas aos edifícios de elevado desempenho energético e edifícios de referência;
- No Capítulo 3 evidencia-se o fundamento teórico relativo ao desempenho energético de edifícios e de arquitetura solar passiva, bem como, a obtenção dos indicadores energéticos e de custo global de edifícios;
- O Capítulo 4 sumaria os métodos de análise de sensibilidade existentes e aplicados no desenvolvimento da presente dissertação;
- No Capítulo 5 apresenta-se o conjunto de resultados obtidos na presente dissertação decorrentes da aplicação do estudo de simulação energética aos casos de estudo formulados;
- O Capítulo 6 resume as principais conclusões desta dissertação, com o intuito de responder às questões colocadas na secção 1.2, e igualmente, apresentar possíveis desenvolvimentos futuros.

1.4. Metodologia

A metodologia adotada na presente dissertação divide-se em três partes. Numa primeira fase serão caracterizadas as geometrias de edifícios de escritórios existentes, pela recolha de informação com recurso a três métodos distintos: i) aos dados disponibilizados nos relatórios dos EM, realizados no âmbito da diretiva de 2010, que caracterizam edifícios de escritórios no caso do método 1; ii) a informação de vários estudos da literatura científica de edifícios de escritórios a nível europeu que utilizam modelos de simulação no caso do método 2; iii) e pela caracterização de edifícios de escritórios existente na região de Lisboa para aplicação do método 3. Esta abordagem permitirá robustecer o estudo e a definição dos edifícios de escritórios tipo, identificando a mais valia dos diferentes métodos para a sua definição.

Numa segunda fase, com recurso a um modelo numérico de simulação energética de edifícios (EnergyPlus [9], com o apoio da ferramenta jEplus [10], de simulação paramétrica de edifícios) será

efetuada a estimativa das necessidades energéticas dos edifícios para as diferentes soluções arquitetónicas, com diferentes qualidades térmicas da envolvente e tendo em conta o seu impacto nos consumos de climatização, ventilação, iluminação e restantes aplicações elétricas do edifício. Esta componente do estudo será efetuada em duas cidades europeias distintas, Lisboa e Helsínquia, de forma a comparar as respostas dos diferentes modelos em dois climas distintos, um predominado pelo aquecimento e outro pelo arrefecimento. Nesta análise centrada nas componentes de arquitetura e qualidade térmica da envolvente, não são evidenciados detalhadamente os sistemas de climatização, sendo adotado um sistema de elevada eficiência, em que, contudo serão avaliadas a influência das cargas térmicas internas.

Na terceira parte do processo metodológico será efetuada uma análise de sensibilidade (SA) face aos resultados obtidos nos modelos de edifícios estabelecidos em duas partes distintas:

1. Análise de SA aos resultados de energia mínima e soluções de custo-ótimo de um único modelo de edifício, tendo por base a combinação de soluções paramétricas, i.e., com todas as combinações possíveis para a banda de valores das variáveis em estudo;
2. Análise de SA com recurso a dois métodos de SA, para comparação da qualidade dos métodos em identificação de soluções de energia mínima e de custo-ótimo, e na identificação dos parâmetros que mais influenciam o desempenho energético dos diferentes modelos em estudo. A componente desta análise é realizada com a ferramenta SIMLAB [11] que realiza análises de sensibilidade e de incerteza de modelos numéricos.

Destes resultados espera-se identificar que tipo de arquiteturas são mais adequadas para efetuar estudos genéricos de rentabilidade de medidas de eficiência energética (soluções de custos ótimos): i) edifício de referência “europeu”; ii) identificação de soluções que conduzam às necessidades quase nulas de energia; iii) soluções ótimas do ponto de vista dos custos de ciclo de vida; iv) comparação de metodologias para efetuar SA em estudos de desempenho energético de edifícios e de soluções de custo-ótimo.

Na Figura 1.3 é possível verificar a metodologia geral adotada.

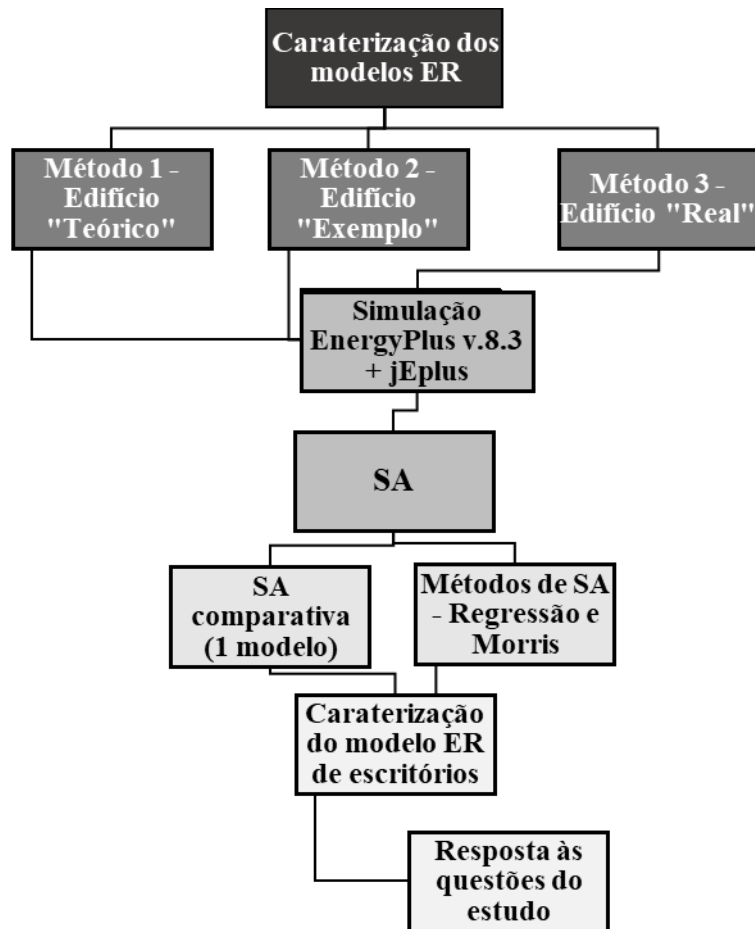


Figura 1.3: Metodologia geral adotada.

2. Capítulo 2 - Estado da arte

2.1. Enquadramento regulamentar e normativo

No panorama crítico de consumo energético do setor dos edifícios e com o propósito de satisfazer o cumprimento do Protocolo de Quioto, a UE no dia 16 de Dezembro de 2002 publicou a Diretiva 2002/91/CE [12] do Parlamento Europeu e do Conselho, no âmbito do desempenho energético dos edifícios, com o objetivo de implementar uma otimização dos consumos energéticos e das condições de conforto no setor. Esta diretiva necessitou mais tarde de uma revisão e reformulação, dando origem à diretiva 2010/31/EU de 19 de Maio de 2010 [4]. Ambas as diretivas pretendem a promoção de uma política de melhoria do desempenho energético dos edifícios com base nas condições climáticas externas, nos requisitos de conforto térmico dos ocupantes e de rentabilidade económica. A implementação destas diretivas adota um conjunto de princípios gerais e objetivos a alcançar através de um método de requisitos mínimos de desempenho energético, atribuindo a cada EM a responsabilidade de transpor para a sua legislação nacional as referidas diretivas.

2.1.1 Diretiva 2010/31/EU

A Diretiva 2010/31/EU [4], revisão e reformulação da EPBD publicada a 19 de Maio de 2010, surgiu com o intuito de simplificar, clarificar e reforçar disposições da diretiva de 2002/91/CE [12], introduzindo novas disposições e conceitos visando um incremento ao quadro de promoção da eficiência energética nos edifícios da UE. Esta diretiva veio assim reforçar a intenção de reduzir a dependência energética da UE do exterior, as emissões de gases de efeito de estufa, os custos de energia para os consumidores e promover um aumento do conforto térmico dos utilizadores de edifícios [13].

A principal obrigação deste documento, que o coloca num novo patamar de exigência para com os EM, é de que estes adotem planos e políticas nacionais de forma a garantir que até 2020 todos os edifícios novos tenham necessidades quase nulas de energia, e que até 2018 edifícios públicos ou sujeitos a grandes renovações cumpram este requisito. Segundo o mesmo, um edifício com necessidades quase nulas de energia (nZEB) é uma construção com um desempenho energético muito elevado, em que as suas necessidades de energia são quase nulas ou de valor baixo, supridas em grande parte por FER produzida no local ou nas proximidades [4].

Esta diretiva escrutina ainda, que os níveis ótimos de rentabilidade dos requisitos mínimos de desempenho energético de edifícios traduzem-se como o desempenho energético que permite obter o custo monetário mais baixo durante o ciclo de vida económico estimado para o edifício, tendo em consideração que [4]:

- a. O custo mais baixo é determinado tendo em conta os custos de investimento, de manutenção e de funcionamento relacionados com a energia; e
- b. O ciclo de vida económico estimado é determinado pelos EM. Diz respeito ao ciclo de vida económico restante estimado de um edifício ou de um componente, se os requisitos de desempenho energético forem fixados para o edifício no seu conjunto ou para os componentes do edifício, respetivamente;

O nível ótimo de rentabilidade situa-se dentro dos níveis de desempenho energético, se a análise de custo-benefício calculada em função do ciclo de vida económico estimado para o edifício for positiva. No caso de se verificar uma diferença de 15% entre os níveis ótimos de rentabilidade calculados, e os em vigor pelos EM estes deverão justificar a diferença ou prever medidas adequadas de modo a reduzir a discrepância [4].

2.1.2 Regulamento delegado N.º 244/2012 e diretrizes

Dado a falta de uma metodologia específica de cálculo dos níveis ótimos de rentabilidade, a Comissão Europeia publicou o regulamento delegado N.º 244/2012 [14] com diretrizes, onde é explicitada a metodologia comparativa a adotar pelos EM para o cálculo dos níveis ótimos de rentabilidade dos requisitos mínimos de desempenho energético, como é possível verificar na Figura 2.1.

Na aplicação da metodologia comparativa de cálculo dos níveis ótimos de rentabilidade devem ser comparadas as medidas de eficiência energética, as medidas que incorporam FER e os pacotes dessas medidas, em relação ao seu desempenho energético e custo da sua aplicação. Esta regulamentação exige a definição de um ER que seja representativo do parque imobiliário nacional típico existente pela sua funcionalidade e localização geográfica, em cada EM. A conceção do ER deverá atender às condições climáticas exteriores da construção, e a uma manutenção mínima do conforto térmico interior dos ocupantes. Esta exigência prende-se fundamentalmente, com a impossibilidade de calcular uma situação ótima em termos de rentabilidade para cada um dos edifícios.

Em acréscimo, o Anexo I do Regulamento Delegado [14] enfatiza que os EM devem, no mínimo, definir ER para todas as categorias de edifícios residenciais, e outras categorias de edifícios não residenciais para os quais existem requisitos específicos de desempenho energético (estabelecimentos de ensino, hospitais, hotéis e restaurantes, instalações desportivas, outros tipos de edifícios que consumam energia). Adicionalmente, para cada tipologia deve existir a definição de um ER no caso de edifícios novos, e pelo menos, dois ER no caso de edificações existentes alvo de renovações profundas. A categorização de edifícios rege-se por critérios de subdivisão como a idade, dimensão, condições climáticas, orientação e proteção solar, padrões de utilização ou zonas climáticas.

Igualmente, na metodologia proposta encontra-se presente a definição de medidas de eficiência energética que serão avaliadas relativamente ao ER definido. Importa referir que uma medida deste tipo se refere a uma alteração efetuada a um edifício que resulte numa redução das necessidades de energia primária do mesmo [14]. Deste modo, uma destas medidas poderá ser aplicada em toda a construção, para componentes individuais ou para uma combinação das mesmas.

Em consequência, é necessária a avaliação das necessidades de energia final e primária dos ER, bem como, dos ER após a aplicação das medidas de eficiência energética definidas à priori. Esta etapa é conseguida pela expressão de um indicador numérico de desempenho energético, que inclui a totalidade da energia anual calculada ou efetivamente, consumida pelo edifício que satisfaz as diferentes necessidades associadas à sua utilização típica. Este indicador reflete a utilização de energia primária, em função dos fatores de energia primária por vetor energético utilizado no edifício [4].

Por último, é efetuado um cálculo global dos custos monetários (isto é, Valor Actual Líquido (VAL)) das medidas de eficiência energética durante o ciclo económico previsto, aplicadas aos ER, com base nos princípios expostos no quadro da metodologia comparativa. Este cálculo permite que os EM avaliem

a rentabilidade dos diversos níveis de requisitos mínimos de desempenho energético, e assim, determinem os níveis ótimos de rentabilidade das medidas de eficiência energética.

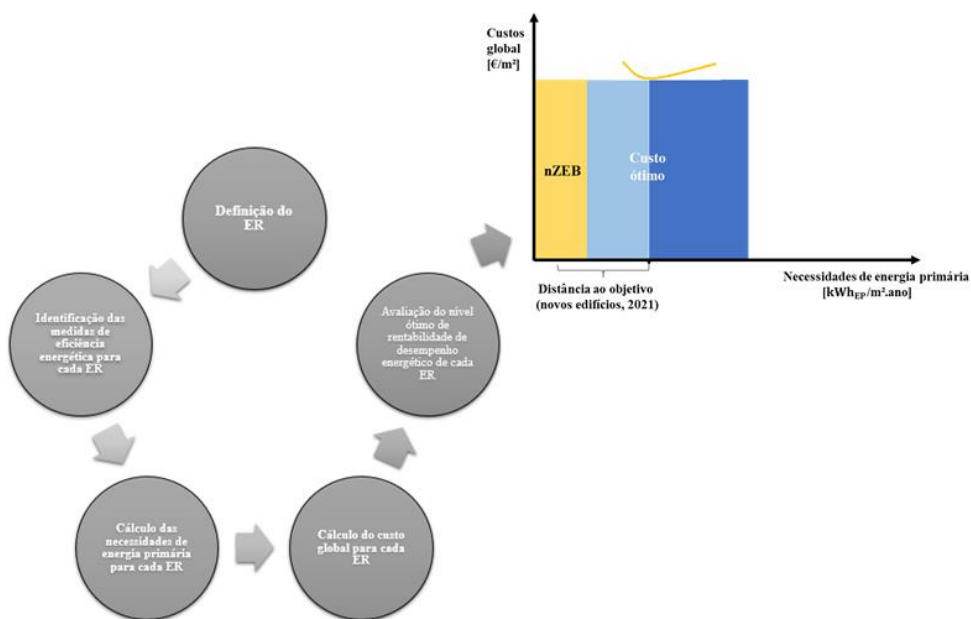


Figura 2.1: Metodologia para estudos de níveis ótimos de rentabilidade de medidas de eficiência energética [15].

2.1.3. Edifícios de elevado desempenho energético (nZEB)

Os edifícios designados de nZEB ou ZEB são construções que detêm um elevado desempenho energético, com necessidades energéticas muito baixas ou nulas, que são supridas na sua totalidade, ou em parte, por FER. A análise energética deste tipo de edifícios segue a premissa de que numa perspetiva anual, o balanço energético da edificação tem de ser nulo, ou próximo de zero, como exemplificado na Figura 2.2.

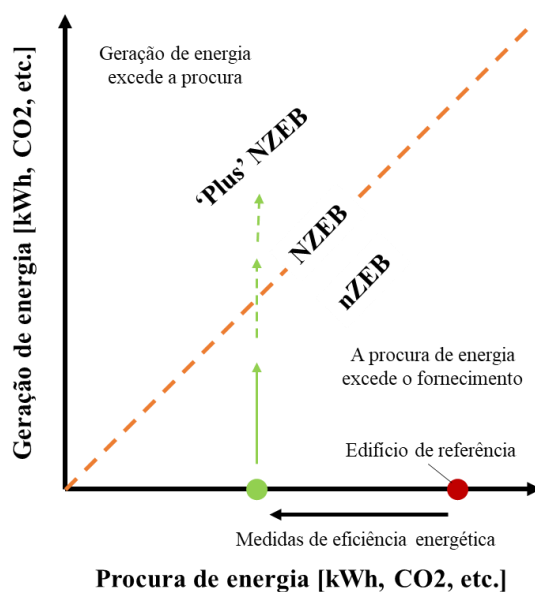


Figura 2.2: Balanço energético esperado de um edifício nZEB ou ZEB [16].

Não obstante desta definição, que é atualmente a mais aceite no que diz respeito ao contexto europeu do que é um edifício nZEB ou ZEB, importa referir que a definição de Nearly Zero Energy Building ou Zero Energy Building, é um conceito relativamente novo e as suas definições concretas encontram-se ainda em desenvolvimento na grande maioria da comunidade internacional.

Historicamente, a primeira definição de edifícios deste tipo remonta aos anos de 1970's, quando Esbensen e Korsgaard (1977) [17], descreveram a primeira habitação de Zero Energia, construída pela Universidade Técnica da Dinamarca, como:

“Com restaurações no âmbito da conservação energética, como uma construção altamente isolada, equipamento de recuperação de calor e sistemas de aquecimento solar, a ‘Zero Energy House’ estará dimensionada para ser auto-suficiente em aquecimento interior e fornecimento de água quente nas condições climáticas habituais na Dinamarca. O fornecimento de energia para a instalação elétrica será conseguido com recurso às instalações locais”

Por sua vez, Torcellini et al. (2006) [18] definiu um ZEB como um edifício residencial ou comercial, com necessidades energéticas reduzidas conseguidas pela aplicação de medidas de eficiência energética, em que o balanço energético pode ser suprido por tecnologias renováveis, ao longo de um ano. Este foi o primeiro a introduzir uma definição mais ampla e concreta, e a preocupação com o sistema de ponderação dos fatores de conversão de energia, dando origem a quatro diferentes definições de ZEB, com base no tipo de compensação pretendida [19]:

- Energia final (Site ZEB);
- Energia primária (Source ZEB);
- Custo (Cost ZEB);
- Emissões equivalentes de dióxido de carbono (Emission ZEB).

Este ainda estabeleceu que um edifício ZEB pode ser definido de várias formas, dependendo da fronteira e métrica que se pretende aplicar ao mesmo. Esta depende do objetivo do projeto, das intenções do proprietário, das preocupações relativas ao clima e às emissões de gases de efeito estufa, e ao custo da energia [20].

Panagiotidou e Fuller (2013) [20] na sua revisão das políticas e do avanço dos governos no contexto dos ZEB's, verificou que a grande maioria das definições existentes de ZEB omitem a energia incorporada nos materiais do edifício, construção e demolição e/ou instalações técnicas. Somente a energia de operação do mesmo é contabilizada, o que leva a uma não avaliação do verdadeiro impacto ambiental da construção [21]. Este facto conduz à indagação de se a utilização de um período de métrica anual é realmente o mais adequado para o objetivo que se pretende implementar.

Por último, Panagiotidou e Fuller (2013) [20] formulou uma das maiores preocupações do contexto ZEB, ou seja, qual o limite de eficiência energética que se deve aplicar neste tipo de edificações. Dado que em todas as definições conhecidas esta não é um pré-requisito, e assim sendo, os edifícios não se encontram necessariamente otimizados para uma redução do consumo energético, antes da integração de sistemas de geração de energia renovável. Deste modo, em muitos casos o objetivo ZEB é alcançado por via de um sobredimensionamento dos sistemas solares fotovoltaicos (PV), e sem a aplicação de medidas de poupança energética, ou por uma mudança no comportamento dos utilizadores.

Nesta dissertação procedeu-se ao levantamento de modelos de edifícios, apelidados de edifícios de elevado desempenho energético. A síntese destas construções atualmente existentes, pretende elucidar sobre qual o tipo de arquitetura e envolvente que correntemente é aplicada nesta tipologia de edificações, permitindo assim, inferir quais as características que favorecem a obtenção de necessidades energéticas muito baixas. Assim sendo, seleccionaram-se os edifícios de escritórios existentes com base na informação disponibilizada em [22], e as suas principais características encontra-se resumidas na Tabela A.1.

Na recolha desta informação podemos verificar quais os dados construtivos, de energia e medidas passivas aplicadas. É ainda referenciado na Tabela A.2 uma descrição das opções arquitetónicas como medidas passivas de eficiência energética aplicadas nestas construções.

2.2. Edifício de referência

No âmbito da diretiva 2010/31/EU, um ER é um edifício característico e representativo da sua funcionalidade e localização geográfica, incluindo as suas condições climáticas interiores e exteriores. Este edifício pretende representar o parque imobiliário típico em termos de condições climáticas e funcionalidade (exemplo: edifícios escolares, edifícios de escritórios, edifícios residenciais) [23].

A complexidade do processo de criação destes modelos de edifícios encontra-se estritamente dependente do nível de detalhe que se pretende impor na definição do edifício [23]. Adicionalmente, o desafio de obter informação detalhada e de fontes credíveis, induz um aumento das implicações que a escolha do caminho metodológico correto pesa na definição do ER para o estudo de avaliação do desempenho energético dos edifícios [23].

Outra problemática na criação do ER deve-se ao facto de a diretiva sugerir que todos os EM usem métodos de simulação térmica dinâmica de edifícios para atingir os resultados pretendidos nos cálculos dos níveis ótimos de rentabilidade com recurso à ferramenta apropriada (ex. EnergyPlus). A utilização desta abordagem requer um nível de informação detalhada elevado, e conseqüentemente sólido, para que um modelo de simulação energética de edifícios possa ser aplicado [23].

Com a convergência de todos os fatores supramencionados, Corgnati et al. (2013) [23] sugeriu um modelo de definição dos ER que sintetiza quatro parâmetros chave para que se obtenha um edifício que seja representativo da tipologia em estudo de um dado parque imobiliário, e que pretende colmatar os desafios que a caracterização e a uniformização dos ER europeus carece.

Os quatro parâmetros chave centram-se na forma, envolvente, sistemas e operação do edifício, como indicado pela Figura 2.3. O parâmetro de ‘Forma’ pretende categorizar o tipo de edifício (ex. escritório, escola, hospital, etc), as suas dimensões e geometria. A ‘Envolvente’ categoriza as tecnologias de construção e materiais aplicados, providenciando uma descrição das propriedades termofísicas que a construção congrega. Os ‘Sistemas’ dizem respeito aos sistemas de aquecimento e arrefecimento, bem como de ventilação, e os sistemas de geração e produção de fontes renováveis que o edifício detenha. A categoria de ‘Operação’ refere-se aos parâmetros de uso do edifício que são expressos pelos horários de utilização dos sistemas energéticos (iluminação e equipamentos elétricos) e a sua ocupação diária.

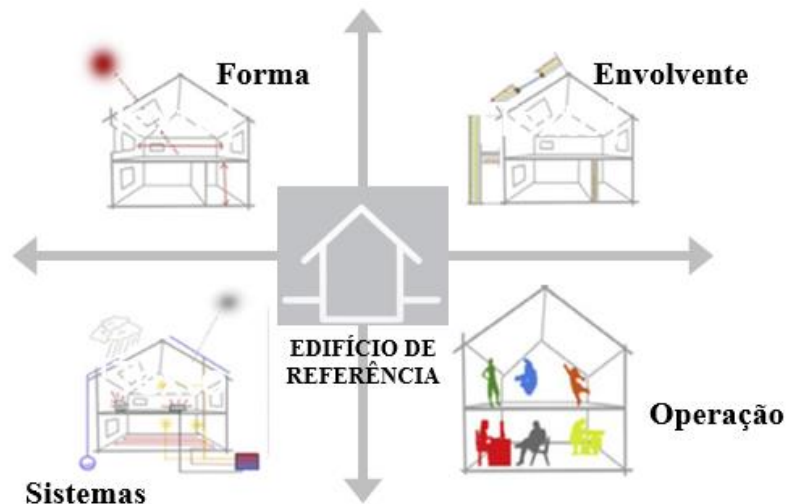


Figura 2.3: Esquemática das componentes fulcrais na conceção de um edifício de referência [23].

O passo de recolha e sistematização da informação detém um peso crucial na definição do ER. Deste modo, a escolha da fonte a utilizar é outro importante passo nesta descrição, que resulta na classificação do tipo de ER que temos como objeto de estudo. Na diretiva 2010/31/EU é sugerido o seguimento do trabalho metodológico desenvolvido pelo projeto TABULA [24], que desenvolveu três métodos de classificação de edifícios de referência. Estes mesmos métodos são de forma similar indicados nos estudos [18], [23], [25], [26], e explicitados da seguinte forma:

Método do “Edifício Exemplo” – Projeta a criação de um edifício virtual, usando as indicações e estudos de peritos com origem em diversas fontes, que para cada parâmetro relevante, inclui os sistemas e materiais mais comuns, de um grupo de edifícios de uma dada localização e idade. Este recurso, é por norma, utilizado quando não existe uma fonte estatística disponível.

Método do “Edifício Real” – Recorre à seleção de um edifício representativo da construção mais típica numa dada categoria. Requer um elevado nível de informação do parque imobiliário existente.

Método do “Edifício Teórico” – Pelo processamento de informação estatística disponível procede-se à criação de um edifício virtual, em que para cada parâmetro relevante, inclui os materiais e sistemas mais comuns numa dada categoria de edifícios do parque imobiliário.

3. Capítulo 3 - Desempenho energético de edifícios: Fatores

A diretiva 2010/31/EU define que o desempenho energético de um edifício corresponde à energia calculada necessária de forma a satisfazer a procura de energia associada à utilização típica do edifício, isto é, à energia utilizada para as necessidades de aquecimento, arrefecimento, ventilação, preparação de água quente, iluminação e restantes equipamentos do edifício [4].

Neste capítulo, importa realçar e descrever os fundamentos teóricos e conceitos aplicados no presente estudo. A abordagem aplicada para obtenção do desempenho energético dos edifícios corresponde à teoria dinâmica de transferência de calor, assumindo que o conforto térmico dos ocupantes cumpre os critérios aplicados a edifícios climatizados, satisfazendo a teoria de Fanger de conforto térmico [27]. Adicionalmente, aspetos referentes aos parâmetros de arquitetura e envolvente que afetam o desempenho energético de um edifício são salientados, com o objetivo de apresentar estratégias que serão utilizadas numa geometria mais satisfatória para a contribuição dos estudos de edifícios de elevado desempenho energético. Igualmente, os parâmetros de sistemas energéticos, conforto térmico e utilização dos espaços serão escrutinados.

3.1. Teoria de transferência de calor dinâmica

Para avaliar o desempenho energético de edifícios é necessário apreciar os fenómenos de transmissão de calor em regime transiente, que envolvem as diferentes fontes de calor interiores (ocupantes, equipamentos elétricos (EE), iluminação, aquecimento e arrefecimento) e a transmissão de calor pela envolvente e entre espaços por condução, convecção e radiação, como esquematizado na Figura 3.1. De forma a resolver as equações de conservação de energia, são normalmente aplicados os métodos das diferenças finitas ou das funções de transferência. A conservação de energia de uma zona térmica ou sala de um edifício é expressa pela equação (3.1) [28]:

$$G_i + G_s + G_v + G_c = \rho C_p V_s \frac{\partial T}{\partial t} + \sum_{n=1}^k A_n U_n (T_i - T_{sn}) \quad [\text{W}] \quad (3.1)$$

Em que:

- G_i - Ganhos internos num compartimento [W];
- G_s - Ganhos solares num compartimento [W];
- G_v - Ganhos de ventilação (infiltrações do ar exterior) [W];
- G_c - Ganhos de carga sensível de climatização [W];
- ρ - Massa volúmica do ar [kg/m^3];
- C_p - Calor específico do ar [$\text{J}/(\text{kgK})$];
- V_s - Volume do compartimento [m^3];
- A_n - Área da superfície n [m^2];
- U_n - Coeficiente de transferência de calor entre o ar interior e a superfície n [$\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$];
- T_i - Temperatura interior do compartimento [K];
- T_{sn} - Temperatura da superfície n [K].

Pela Lei de Fourier [28] que determina a densidade de fluxo de calor no interior de um corpo, pode-se obter a equação que traduz a condução de calor em regime estacionário através dos elementos da envolvente [29], como apresentado pela equação (3.2):

$$G = \frac{1}{R_{\text{int}}} (T_{\text{se}} - T_{\text{si}}) \quad [\text{W/m}^2] \quad (3.2)$$

Em que:

- G – Densidade do fluxo de calor no interior da superfície [W/m^2];
- R_{int} – Resistência térmica superficial [$(\text{m}^2\text{K})/\text{W}$];
- T_{se} – Temperatura superficial exterior [K];
- T_{si} – Temperatura superficial interior [K].

Por último, pela equação (3.3) [30] pode-se aferir as componentes que contribuem para os ganhos solares da envolvente envidraçada:

$$G_s = A_v \times g \times (R_{\text{direta}} \times \cos[AT] \times \cos[AZ] + FfJC \times R_{\text{difusa}}) \quad [\text{W}] \quad (3.3)$$

Em que:

- G_s - Ganhos solares num compartimento [W];
- A_v – Área do vão envidraçado [m^2];
- g – Fator solar do vidro [adimensional];
- R_{direta} – Radiação solar direta incidente na superfície [W/m^2];
- AT – Altitude [m];
- AZ – Azimute [°];
- $FfJC$ – Fator de forma entre a janela e o céu [adimensional];
- R_{difusa} – Radiação solar difusa [W/m^2].

O balanço de energia descrito pela equação (3.1) inclui os mecanismos de transferência de calor por condução (último termo de referida expressão), convecção (ganhos de ventilação) e radiação (ganhos solares), bem como, a energia transferida pelas componentes de iluminação, equipamentos elétricos, ocupação e cargas de climatização (ganhos de carga de aquecimento e/ou arrefecimento. As equações (3.2) e (3.3) representam as componentes de condução de calor entre as superfícies exteriores e interiores, e de ganhos solares da envolvente envidraçada omissas na equação (3.1).

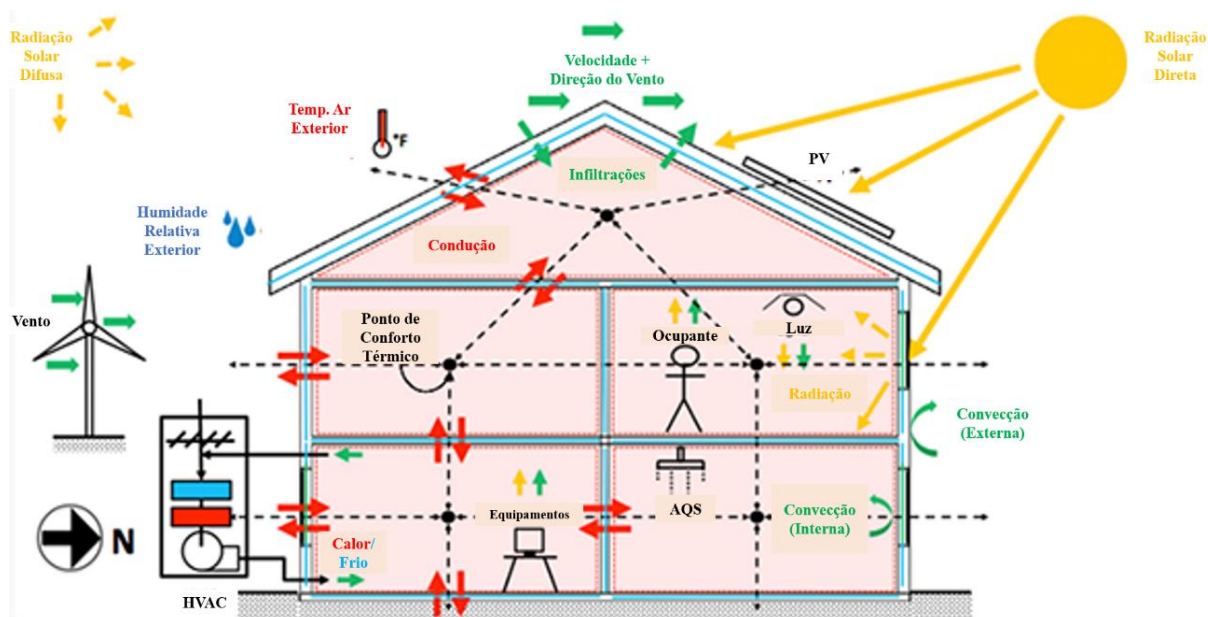


Figura 3.1: Representação esquemática da dinâmica dos processos de transferência de calor num edifício [31].

3.2. Aspectos relevantes na construção solar passiva

Atendendo ao objetivo da presente dissertação, é fundamental identificar que características e componentes de um edifício podem atender às estratégias passivas de eficiência energética, ou seja, sem a utilização de sistemas ativos que consomem energia. Esta opção é a que mais facilmente poderá corresponder a uma abordagem correta para que o nZEB seja mais facilmente formulado no seio da comunidade internacional.

Como referido por Marszal et al. (2011) [21], primeiro deve-se aplicar estratégias de modo a otimizar a eficiência energética de um edifício, minimizando os gastos energéticos inerentes à sua utilização. Somente após essa otimização, se deverá compensar essas necessidades com a produção de energia por via de FER no local ou nas proximidades da construção [4], de modo, a obter o balanço energético nulo no âmbito da conceção de um edifício nZEB.

Um edifício solar passivo aproveita as condições locais, do clima e as suas características de envolvente para minimizar o consumo energético. Uma construção deste tipo ao ser corretamente concebida reduz as cargas de aquecimento e arrefecimento por via de estratégias de eficiência energética, e supre as suas necessidades de energia com recurso à energia solar [32].

Ralegaonkar et al. (2010) [33] refere que os parâmetros que mais contribuem para este tipo de arquitetura são:

- O rácio de área de vão envidraçado por área de fachada do edifício ('Window-to-Wall ratio' – WWR), e a sua localização;
- Orientação do edifício;
- Sombreamento apropriado, para controlo da admissão de radiação solar incidente no interior.

Importa ainda atender ao isolamento da envolvente opaca, ao controlo das admissões de ar para ventilação, ao tipo e localização de inércia térmica aplicada e à utilização de sistemas de aquecimento e arrefecimento auxiliares [33].

Pode-se assim sistematizar-se como aspetos comuns das soluções passivas [34]:

- Elevado aproveitamento dos ganhos solares para aquecimento interior pela adoção de vãos expostos a sul, com elevado fator solar, e soluções que permitam ganhos indiretos como estufas e paredes de trombe;
- Forte inércia térmica para armazenamento dos ganhos de calor e evitar o sobreaquecimento;
- Existência de estratégias de ventilação natural para assegurar a qualidade do ar interior e permitir a aplicação de ‘free-cooling’. Igualmente, a orientação e forma do edifício permitem o favorecimento da ventilação transversal, podendo utilizar-se vegetação exterior para “controlar” a ação do vento na construção;
- Aplicação de sombreamento exterior dos vãos envidraçados, para redução dos ganhos de calor na estação de arrefecimento;
- Espaços pouco profundos para permitir um maior aproveitamento de iluminação e ventilação;
- Aplicação correta de isolamento térmico na envolvente opaca e não-opaca de forma a reduzir a transferência de calor entre o espaço exterior e interior.

Nas secções seguintes explica-se cada um dos fatores de construção solar passiva ponderados no presente estudo.

3.2.1. Localização geográfica – Orientação e condições climáticas

A localização geográfica de um edifício corresponde ao ponto na superfície terrestre no qual este pode ser localizado, segundo o sistema de coordenadas astronómicas – latitude (ϕ) e longitude (ψ). A latitude pode ser definida com base no plano equatorial, e é medida como o ângulo entre 0° e 90° (positiva nos pontos a norte do equador e negativa nos pontos a sul do equador). A longitude é definida com sendo positiva nos pontos a este da linha de Greenwich, sendo medida num intervalo angular entre 0° e 180° [35]. A altitude corresponde à distância vertical medida entre um ponto e um ‘datum’ (superfície de referência), que por norma, corresponde ao nível médio do mar [36].

Relativamente à localização (latitude e longitude) estão normalmente associadas condições climáticas distintas, sendo que para latitudes mais baixas os edifícios são dominados por necessidades de arrefecimento, como por exemplo, a cidade de Lisboa ($GD_{Lisboa}=1071$ °C/dia [37]). No caso de latitudes mais elevadas, as construções são dominadas por necessidades de aquecimento, como por exemplo, a cidade de Helsínquia ($GD_{Helsínquia}=3878$ °C/dia [38]) que são respetivamente as localizações em estudo na presente dissertação.

A orientação do edifício afeta a intensidade e ângulo de incidência da radiação solar, o potencial de aproveitamento para aquecimento interior, o nível de iluminação natural, bem como, a facilitação na aplicação de soluções de sombreamento na orientação sul (maior altura solar¹ [39]) que nas direções nascente e poente (menor altura solar) [40], e de outras soluções solares passivas. Deste modo, a sua

¹ Altura Solar – Ângulo que determina o lugar do Sol na sua trajetória aparente ao redor da Terra.

otimização é prioritária na eficiência energética de um edifício, com o intuito de aumento do conforto térmico por um menor custo energético e monetário. Na generalidade das construções a orientação Sul é a ótima, como medida de maximização dos ganhos solares no Inverno e minimização no Verão [35].

Neste sentido considera-se como relevante a variação da localização dos edifícios em estudo a nível de latitude para confronto de duas situações de exposição das construções a condições climáticas distintas, e a adoção da orientação sul do edifício em todos os casos de estudo.

3.2.2. Características geométricas

Como referido nas secções anteriores, os princípios da construção solar passiva devem ser contemplados na fase inicial do projeto da construção, identificando quais as melhores características para a mesma, atendendo à minimização do consumo energético na fase posterior de operação. De uma forma geral, os ocupantes manifestam maior satisfação e tolerância nas condições ambientais interiores em edifícios passivos do que em edifícios convencionais com climatização.

Atendendo às características geométricas do edifício importa efetuar um projeto adequado à localização geográfica do mesmo (latitude, longitude e altitude), às condições climáticas do local e ao objetivo do empreendimento. Para tal, o dimensionamento das suas características geométricas, é uma fase crítica do processo de projeto inicial, para o objetivo de se atingir uma construção passiva ou de elevado desempenho energético.

Nestes fatores importa dimensionar corretamente a fração de fachada envidraçada e a orientação da mesma, bem como, aplicar o tipo de vão que minimiza o dispêndio energético da construção. É fundamental, a aplicação de dispositivos de sombreamento, e um controlo eficaz da admissão de radiação solar incidente, tanto numa perspetiva de minimização de ganhos solares diretos e indiretos, como para controlo da iluminação natural disponível no interior.

3.2.2.1. Fator de forma e compactacidade

O conceito de fator de forma (FF) corresponde ao rácio entre a totalidade de área superficial exterior de um edifício e o seu volume interno total (equação (3.5)) [41], correspondendo a uma medida de compactacidade de uma construção. A área total externa de uma superfície corresponde à soma da área de todas as paredes externas, cobertura e pavimento em contacto com o solo [6]. A avaliação deste aspeto torna-se prioritária, uma vez que, maior ou menor fração de área de superfície exposta às condições exteriores, em proporção com o seu volume, terá efeitos preponderantes nas perdas térmicas da envolvente, e conseqüentemente, no desempenho energético.

A compactacidade de uma construção pode ser definida como o rácio entre o volume interno total e a área de superfície total exterior [42]. Em concordância com o parâmetro de fator de forma, ao avaliar esta medida, é possível quantificar o impacto que as proporções do edifício detêm no seu consumo energético. Este rácio é dado pela equação (3.4):

$$\text{Compactacidae} \left[\frac{\text{m}^3}{\text{m}^2} \right] = \frac{\text{Volume} \left[\text{m}^3 \right]}{A_{\text{superfície}} \left[\text{m}^2 \right]} \quad (3.4)$$

De uma forma geral, quanto mais compacto o edifício (menor FF) menores necessidades de energia este apresenta, pois é sujeito a uma menor exposição das superfícies exteriores às condições climáticas exteriores. Por outro lado, numa construção mais compacta os espaços apresentam na generalidade uma maior profundidade, podendo assim comprometer o aproveitamento dos níveis de iluminação natural, assim como do sucesso para a aplicação de estratégias de ventilação dos espaços, afetando decisivamente as necessidades energéticas do edifício.

$$\text{FF} \left[\text{m}^{-1} \right] = \frac{A_{\text{superfície}} \left[\text{m}^2 \right]}{\text{Volume} \left[\text{m}^3 \right]} \quad (3.5)$$

3.2.2.2. Window-to-Wall ratio (WWR)

O rácio entre a área total de superfície envidraçada e área total de fachada do edifício (equação (3.6)) [41] é definido como o ‘Window-to-Wall ratio’. Este aspeto apresenta um peso profundo no balanço energético do edifício e na aparência arquitetónica do mesmo, sendo afetado por múltiplos fatores como o clima, o isolamento da envolvente, o tipo de vão envidraçado e a orientação dos mesmos [43].

$$\text{WWR} [\%] = \frac{A_{\text{vão envidraçado}} \left[\text{m}^2 \right]}{A_{\text{fachada}} \left[\text{m}^2 \right]} \quad (3.6)$$

O regulamento de desempenho energético de edifícios de comércio e serviços (RECS) [44] determina que este rácio tome o valor de 30% da área total de fachada e 0% na superfície de cobertura, nos ER portugueses. No que diz respeito ao regulamento finlandês [45] este aconselha a utilização de uma fração de 15% da área total de fachada, e que esta não deverá ultrapassar os 50% em modelos de referência.

Na presente dissertação adotam-se três valores de WWR, de modo a permitir uma maior gama de soluções, que assim não se restringem somente a valores de referência.

3.2.3. Ganhos solares e iluminação natural

A radiação solar é a fonte de energia principal do planeta, fornecendo calor e luz natural. Pode ser definida como a quantidade de energia radiante emitida pelo sol que atinge uma superfície, podendo ser dividida em duas componentes: radiação direta e difusa [33]. Nesta secção, alguns conceitos importantes no domínio do desempenho energético dos edifícios e a relação com estas variáveis serão escrutinados, como o fator solar (g) de um vão envidraçado e iluminância de um espaço.

3.2.3.2 Fator solar do vidro (g)

O fator solar do vidro, pode ser definido como a fração de radiação solar que atinge a superfície deste, e que contribui para o aumento da temperatura interior incluindo, além da radiação transmitida a fração de calor absorvida pelo vidro. Quanto menor o fator solar, maior a proteção face a estas frações da

radiação solar que são transmitidas para o interior dos espaços, e assim maior o desempenho energético do componente [29].

3.2.3.3 Iluminância

A iluminância ou nível de luz pode ser definida como a quantidade de energia luminosa que atinge um dado ponto numa superfície, denominado o fluxo luminoso (lúmen, lm) por metro quadrado [46]. Outro conceito associado é a eficácia luminosa, que define a relação entre o fluxo luminoso que a lâmpada emite e a sua potência (lm/W) [35]. Deste modo, a iluminância, medida em lux, corresponde à densidade de fluxo luminoso (i.e, a quantidade de luz que atinge uma superfície) que, por sua vez é equivalente a lúmen por metro quadrado.

Os aspetos acima referidos permitem determinar a iluminação necessária para o plano de trabalho, em que uma parte é providenciada pela componente de iluminação natural, e a restante por iluminação artificial (dispositivos elétricos de iluminação, como lâmpadas). Assim sendo, obtendo a quantidade de iluminação natural existente num espaço num determinado momento, é possível determinar o número necessário de dispositivos a instalar, de modo a que os níveis de iluminação mínimos do espaço de trabalho sejam assegurados [35].

No que diz respeito ao RECS este menciona que nos ER portugueses, o valor de densidade de potência de iluminação (DPI, $(W/m^2)/100lux$) deverá tomar o valor de 2.4 $(W/m^2)/100lux$ no caso de salas de escritórios com uma ocupação entre uma a seis pessoas, e em caso de espaços de circulação ou sanitários o valor de 3.8 $(W/m^2)/100lux$ [44]. O regulamento finlandês não determina valores de referência ou indicações no que respeita a esta componente para os seus ER.

3.2.4. Características da envolvente

O aspeto de caracterização da envolvente, nomeadamente, no que diz respeito à solução construtiva aplicada (em particular, a espessura de isolamento térmico) e tipo de vão envidraçado, serão objeto de variação no presente estudo.

Este ponto é avaliado pelo valor de coeficiente de transferência de calor (U , $W/(m^2K)$) das várias superfícies de um edifício (pavimento, cobertura, parede exterior e parede interior, portas e janelas), que determina a perda de calor por unidade de área da superfície da envolvente [35], e outras propriedades térmicas inerentes aos materiais que constituem a solução construtiva, ou propriedades óticas que são intrínsecas ao tipo de vão envidraçado.

3.2.4.1. Envolvente opaca

Para futura aplicação da metodologia deste estudo, ir-se-á aplicar uma única solução construtiva com variação da espessura de isolamento, já que são as propriedades deste que contribuem de forma mais determinante para o comportamento térmico da envolvente da construção.

Os materiais de isolamento são caracterizados pelas suas propriedades térmicas, acústicas e ambientais [47]. Contudo, neste estudo focar-se-á nas características térmicas do material, como: espessura (m), condutibilidade térmica ($W/(mK)$), massa volúmica (kg/m^3) e calor específico ($J/(kgK)$). Para a futura

análise de soluções de custo-ótimo, dados como o tempo de vida (anos) e o preço por metro quadrado ($\text{€}/\text{m}^2$) serão necessários.

A nível de regulamentação nas duas localizações em estudo, em Portugal existe a exigência para com edifícios de comércio e serviços, em que na zona climática de Lisboa, o valor de U máximo da envolvente opaca, toma o valor de $1.00 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ para elementos verticais (por exemplo, paredes exteriores), e de $1.60 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ para elementos horizontais (por exemplo, superfícies de cobertura). No que respeita aos valores de referência para este coeficiente, no caso dos elementos verticais este toma o valor de $0.60 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, e de $0.45 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ para os elementos horizontais [44].

O regulamento finlandês escrutina que o valor de U total da envolvente opaca não deve ser superior a $0.60 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, exigindo como valores de referência para os seus ER de $0.17 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ para as superfícies respeitantes às paredes exteriores e cobertura, e $0.09 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ para o pavimento em contacto com o solo [45].

3.2.4.2. Vãos envidraçados

A envolvente envidraçada apresenta um papel crucial na transferência de energia entre o interior e o exterior da construção, bem como, nos níveis de iluminação natural admitidos [35]. Na generalidade dos vãos envidraçados estes apresentam um valor de U bastante superior aos da restante envolvente, o que representa uma importante fonte de perda de calor. Igualmente, esta componente afeta o aquecimento ou arrefecimento dos espaços, uma vez que, a radiação solar que entra por estas superfícies pode causar ganhos solares indesejados no Verão, mas apresentar efeitos positivos no Inverno.

Adicionalmente, os vãos envidraçados são uma fonte de iluminação natural dos espaços, contribuindo para o conforto térmico dos ocupantes e para a energia utilizada em iluminação artificial. Neste tipo de materiais, as características mais relevantes para a avaliação do seu desempenho energético, correspondem ao valor de U, g, a transmitância solar (%), a reflexão externa (%), e a emissão interna e externa (%). Nas considerações de custo-ótimo, será necessário obter o tempo de vida (anos) e o preço por unidade de superfície ($\text{€}/\text{m}^2$) destes componentes.

No que respeita aos regulamentos adotados nas duas localizações em estudo para a tipologia de edifícios em estudo, em Lisboa é determinado um valor de U de referência de $3.30 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, não existindo uma exigência ao nível do valor de g para os vãos sombreados como nos modelos em estudo [44]. Na localização de Helsínquia é recomendado um valor de U dos vãos envidraçados não superior a $1.80 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, sendo aconselhado adotar um valor de referência de $1.00 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ [45].

3.3. Sistemas energéticos

Para garantir o conforto térmico dos ocupantes num espaço, existem várias tecnologias de climatização. Neste estudo, dado que o foco não incide nesta componente, será considerada a utilização de um sistema de chiller/bomba de calor para suprir as necessidades de arrefecimento e aquecimento, respetivamente. Todos os custos relacionados com ligações de tubagens não serão considerados para perdas energéticas e de custo monetário.

3.3.1. Chiller/Bomba de calor

A utilização de um chiller ou bomba de calor apresenta por base o mesmo processo operativo, diferindo somente no seu objetivo. O propósito de um chiller é de manter o espaço arrefecido a uma baixa temperatura removendo o calor do seu interior. Por sua vez, a bomba de calor permite manter um espaço aquecido a uma temperatura elevada ao absorver calor de uma fonte de baixas temperaturas (água ou ar), e fornecendo-o a um ambiente interno mais quente.

A eficiência do chiller e bomba de calor é dado pela sua capacidade de aquecimento e/ou arrefecimento e o Coeficiente de Performance (COP), e/ou Índice de Eficiência Energética (EER). Estes aspetos podem ser definidos pelas seguintes expressões (3.7) e (3.8) [48]:

$$\text{COP} = \frac{E_{\text{aquecimento,elétrico}} [\text{kW}]}{\text{Nec. aquecimento} [\text{kW}]} \quad (3.7)$$

$$\text{EER} = \frac{E_{\text{arrefecimento,elétrico}} [\text{kW}]}{\text{Nec. arrefecimento} [\text{kW}]} \quad (3.8)$$

No que respeita aos valores considerados recorreu-se ao regulamento N.º 206/2012 [49] da Comissão Europeia que estabelece os requisitos de conceção ecológica para aparelhos de ar-condicionado e ventiladores, tendo-se adotado um valor de COP e EER de 3.80 e 4.60, respetivamente. Estes valores são referentes a coeficientes sazonais (SCOP e SEER), que traduzem na ótica do regulamento uma eficiência mais adequada e realista deste tipo de aparelhos, ou seja, de máquinas de elevada eficiência.

3.4. Indicadores de desempenho energético para identificação de soluções de custo-ótimo

O desempenho energético de cada modelo de edifício em estudo será analisado numa perspetiva energética e de custo económico. Para tal, é necessário recorrer a indicadores que quantifiquem a dicotomia de energia mínima e custo-ótimo, e que possibilitem a identificação das soluções passivas para soluções de custo-ótimo.

Em termos de avaliação do desempenho energético dos modelos, estes serão avaliados com recurso ao indicador de eficiência energética (IEE), que permite estimar as necessidades de energia anuais do edifício por unidade de energia primária. Este contempla a totalidade anual por unidade de área das necessidades de energia para aquecimento, arrefecimento e ventilação, e o consumo energético de iluminação e equipamentos elétricos ponderados pelo fator de conversão (FC) da fonte de energia primária utilizada em energia elétrica na localização da construção, sendo dado pela seguinte expressão:

$$\text{IEE} [\text{kWh}_{\text{EP}}/\text{m}^2 \cdot \text{ano}] = \frac{\sum_{i=1}^{8760} \text{Necessidades anuais de energia}_i [\text{kWh}_e] \times \text{FC}}{\text{Área de pavimento útil} [\text{m}^2]} \quad (3.9)$$

Na presente dissertação utilizou-se os FC de 1.7 [45] para a localização de Helsínquia e de 2.5 [44] para a localização de Lisboa. O menor valor de FC na Finlândia, conduz a que as necessidades de energia primária de edifícios nesse país sejam mais próximas das necessidades de energia primária em Portugal, por comparação com a diferença de necessidades de energia final de edifícios a ser obtida para os dois países.

No presente estudo torna-se útil referir que a regulamentação da Finlândia admite um valor máximo de IEE igual a 190 kWh_{EP}/m².ano [45] na tipologia de edifícios de escritórios. No caso de Portugal o limite regulamentar é baseado num edifício de referência. No âmbito do programa de acompanhamento da UE de implementação da EBPD no ano de 2016 [50], para Portugal encontra-se definido que edifícios novos de escritórios o valor de necessidades de energia primária máximo deverá ser de 192 kWh_{EP}/m².ano e de 137 kWh_{EP}/m².ano para o nível de custo-ótimo.

No que diz respeito ao desempenho económico, o pretendido é avaliar se as diferentes soluções aplicadas apresentam viabilidade em termos de custos. Recorrendo ao regulamento delegado N.º. 244/2012, e considerando somente o cálculo dos custos monetários numa perspetiva macroeconómica, os custos globais (C_g) são dados pela equação (3.10):

$$C_g(\tau)[\text{€/m}^2] = C_1 + \sum_j \left[\sum_{i=1}^{\tau} (C_{a,i}(j) \times R_d(i) + C_{c,i}(j)) - V_{f,\tau}(j) \right] \quad (3.10)$$

Em que:

- τ – Período de cálculo [anos];
- $C_g(\tau)$ – Custo global no período de cálculo (relativo ao ano inicial τ_0), em €/m²;
- C_1 – Custo inicial de investimento para a medida ou conjunto de medidas, em €/m²;
- $C_{a,i}(j)$ – Custo anual no ano i para a medida ou conjunto de medidas j . Este custo diz respeito ao custo da energia elétrica anual utilizada para suprir as necessidades de aquecimento e/ou arrefecimento para a medida aplicada durante o ano considerado em €/m² [51], com a adição dos custos de manutenção e/ou substituição dos componentes; O preço da energia aplicado no presente estudo encontra-se na Tabela A.10.
- $V_{f,\tau}(j)$ – Valor residual da medida ou conjunto de medidas j no final do período de cálculo. Este valor é determinado por depreciação linear do investimento inicial até ao final do período de cálculo, em €/m²;
- $R_d(i)$ – Fator de desconto para o ano i , com base na taxa de desconto r a calcular pela equação (3.11)

$$R_d(p) = \left(\frac{1}{1 + \frac{r}{100}} \right)^p \quad (3.11)$$

Em que p corresponde ao número de anos do período de cálculo, espaço temporal este que corresponde ao ciclo de vida estimado para a construção, que no caso dos edifícios de escritórios se considera 20 anos. Por sua vez, r corresponde à taxa de desconto real que numa perspetiva mais conservadora da EPBD para a estimação dos custos globais numa perspetiva macroeconómica se considera de 3%.

- $C_{c,i}(j)$ – Custo do carbono para a medida ou conjunto de medidas j durante o ano i . Os custos de carbono considerados, são os valores vinculativos mínimos citados na EPBD, por tonelada de CO₂, 20 EUR até 2025, 35 EUR até 2030 e 50 EUR além desta data.

4. Capítulo 4 – Métodos de análise de sensibilidade

Os métodos de SA têm sido largamente aplicados nos últimos anos de modo a identificar as variáveis que mais afetam o desempenho térmico de um edifício, tanto em modelos de simulação energética como em estudos de observação do desempenho energético da construção [52].

Os métodos de análise de sensibilidade podem ser divididos em métodos locais e métodos globais [53]. Os métodos locais são uma abordagem mais simplificada deste tipo de análise, baseando-se numa aproximação numérica das derivadas locais entre os resultados e os valores de entrada do parâmetro, de modo a estimar a sensibilidade do mesmo. Por sua vez, os métodos globais apresentam várias abordagens possíveis, podendo ser divididas em: método de regressão, ‘screening-based’, ‘variance-based’ e ‘meta-model’. Na Figura 4.1 encontram-se resumidos os possíveis métodos globais de SA:

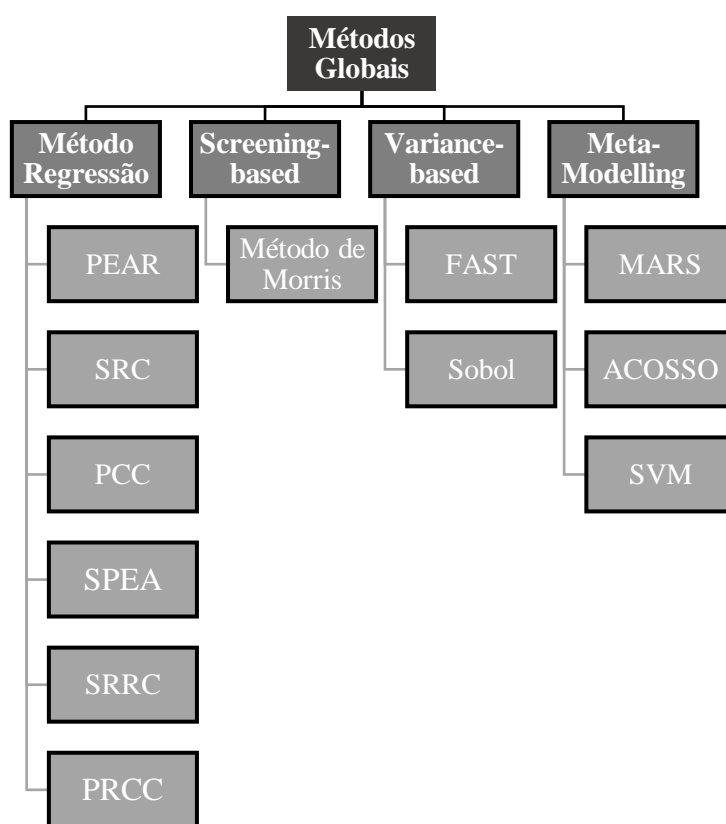


Figura 4.1: Métodos globais de SA.

4.1. Método Local

O método local é o mais simples para efetuar análise de sensibilidade a um dado conjunto de variáveis face aos restantes métodos salientados no ponto anterior. Este recorre a um espaço de valores de entrada do modelo y , que contém um número k parâmetros de entrada x_i que é explorado em torno de um caso base [54]. Deste espaço de amostragem é possível obter um indicador apelidado de ‘Sensitivity Index’ (SI), calculado com base nas derivadas parciais dos resultados obtidos do modelo em análise, como dado pela expressão (4.1)

$$SI_i [\%] = \frac{\% \Delta y}{\% \Delta x_i} = \frac{\left| \frac{y^{(2)} - y^{(1)}}{\bar{y}} \right|}{\left| \frac{x_i^{(2)} - x_i^{(1)}}{\bar{x}} \right|} \quad (4.1)$$

Este indicador permite expressar a elasticidade dos resultados em termos do valor médio dos mesmos, como uma percentagem da variação dos valores referentes aos resultados face aos valores iniciais do modelo [54].

Este método apresenta baixos custos de computação, facilidade de implementação e interpretação e não considera interações entre as variáveis de entrada do modelo. Contudo, é uma abordagem indicada para um pequeno número de parâmetros, tendo sido usada intensivamente na análise do desempenho energético de edifícios [55]. Em termos de aplicação deste método, este foi utilizado por Spitler et al. (1989) [56] no seu estudo de uma residência familiar de modo a analisar qual a influência de cinco parâmetros nas assunções realizadas no processo de simulação energética. Por sua vez, Heiselberg et al. (2009) [52] recorreu ao SI de modo a determinar quais parâmetros deveriam ser incluídos na SA, no seu estudo de aplicação de um método de SA no projeto de edifícios sustentáveis.

4.2. Método de Regressão

A recorrência na utilização do método de regressão na análise de sensibilidade do desempenho energético de edifícios verifica-se devido à facilidade de computação e de compreensão dos índices de sensibilidade que este método faculta. A Tabela 4.1 sintetiza a totalidade dos índices de sensibilidade utilizados na aplicação desta abordagem de SA.

Tabela 4.1: Índices de sensibilidade associados ao método de regressão e sua descrição.

Índices de Sensibilidade	Descrição
<p>PEAR (Pearson product moment correlation coefficient) (Nguyen et al. (2015)) [57]</p>	<p>Avalia o coeficiente de correlação linear usual entre o conjunto de resultados Y e um dado conjunto de valores de variáveis independentes X_i. É somente aplicado a modelos lineares.</p>
<p>SRC (Standardised Regression Coefficients) (Nguyen et al. (2015)) [57]</p>	<p>Indicador da força de correlação entre o conjunto de resultados Y e o conjunto de fatores de entrada X_i, por via de um modelo de regressão linear com a forma $y_i = a + \sum_j b_j x_{ij} + \varepsilon_j$, onde y_i, i=1...m, são os valores correspondentes aos resultados dos modelos, b_j, j=1...n são os coeficientes que devem ser determinados, e ε_j corresponde ao erro (residual) devido à aproximação efetuada pelo modelo de regressão (m corresponde ao número de valores na amostra, e n ao número de variáveis da amostra).</p>

<p>PCC (Partial Correlation Coefficient) (Nguyen (2013)) [58]</p>	<p>Indicador da força da correlação entre os resultados do modelo Y e o conjunto de fatores de entrada X_i, que não se encontrem modificados pelos efeitos da correlação entre X_j e X_i. Caso os fatores de entrada não sejam correlacionados, a ordem de importância da variável baseada em SRC's ou PCC's é exatamente a mesma. Este índice providencia uma medida da importância da variável que tende a excluir os efeitos de outras.</p>
<p>SPEA (Spearman coefficient) (Nguyen et al. (2015)) [57]</p>	<p>Este índice é essencialmente o mesmo que PEAR, contudo usa a classificação dos valores obtidos entre o conjunto de resultados Y e o conjunto de fatores de entrada X_j, ao invés dos seus valores brutos.</p>
<p>SRCC (standardized rank regression coefficient) (Nguyen et al. (2015)) [57]</p>	<p>Este índice baseia-se na análise de regressão, mas contém uma melhoria devido à introdução da classificação de transformação. Pelos seus resultados, é possível obter uma ideia satisfatória mesmo que: (i) as variáveis de entrada não contenham uma correlação; (ii) as relações entre as variáveis de entrada e de saída são não-lineares e monotónicas.</p>
<p>PRCC (partial rank correlation coefficients) (Nguyen et al. (2015)) [57]</p>	<p>Este índice é o valor de PCC, mas calculado com as classificações do conjunto de fatores de entrada do modelo. Este demonstra o mesmo desempenho que SRCC, sendo adequado para modelos monotónicos, e não totalmente satisfatório para modelos não-monotónicos.</p>

Em termos da aplicação destes índices em estudos de desempenho energético de edifícios, verifica-se que o índice SRC foi o mais utilizado, ao ser aplicado por Domínguez-Muñoz et al. (2010) [59] para determinar os fatores-chave que influenciavam o pico das necessidades de arrefecimento de uma zona de perímetro num edifício de escritórios de três pisos em Espanha. Hygh et al. (2012) [60] recorreu à ferramenta de simulação EnergyPlus, de modo a explorar o desempenho energético de edifícios de escritórios em quatro cidades dos Estados Unidos da América (EUA) por via do índice de sensibilidade SRC. Ballarini et al. (2012) [61] usou este índice para determinar quais os fatores-chave que afetavam as necessidades de energia para arrefecimento num edifício residencial em Itália. Breesch et al. (2010) [62] aplicou este índice para aferir quais as variáveis mais influentes no conforto térmico de um edifício de escritórios típico na Bélgica que continha uma estratégia de ventilação noturna cruzada.

Por sua vez, o índice SRCC foi recorrentemente utilizado no estudo de Yildiz et al. (2012) [63], o qual analisou a carga anual de arrefecimento num apartamento num clima quente e húmido, usando este índice com o programa informático EnergyPlus. De Wilde et al. (2012) [64] usou esta medida de sensibilidade de modo a determinar quais as variáveis que mais contribuíam no uso de energia para aquecimento num edifício de escritórios no Reino Unido.

4.3. Método de Morris

O método de Morris [65] é a abordagem de SA classificada como a mais interessante no âmbito do desempenho energético de edifícios [52]. A sua aplicação a modelos de simulação energética de edifícios é conseguida pela definição do modelo energético como uma função matemática $Y(X)$, sendo Y o vetor com os valores dos resultados do modelo (que depende dos resultados sobre qual queremos escrutinar a análise, podendo ser as necessidades de energia para aquecimento, arrefecimento, energia primária, ou produção por FER), e X toma os valores de uma matriz $N \times k$ com os valores das variáveis de entrada do modelo, sendo N a amostragem dos k parâmetros de entrada. Os valores de k são definidos dentro de uma banda dos possíveis valores que cada variável toma, dentro dos limites inferiores e superiores definidos como X_{\min} e X_{\max} , respetivamente [66].

A abordagem deste método pressupõe uma eficiente triagem dos parâmetros combinado com a aplicação de uma estratégia de amostragem, de modo a identificar que parâmetros podem ser fixos em qualquer valor dentro da banda de valores definida para a variável, sem que afete a variância do modelo. A amostragem do espaço de valores dos parâmetros é realizada por meio de uma normalização das variáveis entre 0 e 1, e dividindo cada intervalo das variáveis num dado número de níveis p , que formam assim uma matriz regular. O ponto de partida da amostragem desta matriz é escolhido aleatoriamente, e cada amostra difere só numa coordenada do ponto anterior [54],[67]. Assim, uma sequência de $k+1$ pontos, em que cada parâmetro se altera somente uma vez num valor pré-definido Δ_i , é denominada de trajetória (r). Um ponto desta trajetória representa uma avaliação do modelo.

Morris sugeriu que a avaliação da influência de cada parâmetro individual é possível de obter por via do denominado ‘Efeito Elementar’. Este indicador pode ser definido como:

$$EE_i = \frac{Y(X + e_i \Delta_i) - Y(X)}{\Delta_i} \quad (4.2)$$

Onde e_i representa um vetor de zeros, excepto para o último componente que se igual a ± 1 , o que adiciona uma mudança incremental no parâmetro i [67].

O seguimento das diferentes r trajetórias (índice t), providencia r estimativas dos EE’s para cada parâmetro. Assim, a influência individual de cada parâmetro é avaliada pelo valor médio, μ_i , e o desvio-padrão, σ_i , do conjunto dos efeitos elementares para cada parâmetro, como verificado pelas equações (4.3) e (4.4), respetivamente [68], [69]:

$$\mu_i = \frac{1}{r} \sum_{t=1}^r |EE_{i,t}| \quad (4.3)$$

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{1}{r-1} \sum_{t=1}^r |EE_{i,t} - \mu_i|^2} \quad (4.4)$$

O valor médio, μ_i , permite estimar a influência do parâmetro de entrada, x_i , enquanto o desvio-padrão, σ_i , é uma medida das interações do parâmetro em análise com outros parâmetros e quaisquer outros

efeitos não-lineares que o parâmetro sofra. Deste modo, o valor médio é utilizado para classificar os parâmetros por ordem de importância.

Em termos de custos computacionais este método apresenta custos muito mais baixos quando comparados com o método local, por exemplo. Heiselberg et al. (2009) [52] recomenda a utilização de um número mínimo de trajetórias $r=4$ como razoável de modo a abranger a totalidade dos parâmetros, e de $r=10$ para se obter resultados mais robustos.

Na sua aplicação no âmbito da avaliação do desempenho energético de edifícios, Heiselberg et al. (2009) [52] aplicou este método de modo a identificar os parâmetros chave que influenciam o uso de energia num edifício de escritórios na Dinamarca. Hygh et al. (2012) [60] recorreu a este método para avaliar o desempenho da ventilação natural num edifício residencial de 15 pisos na Coreia. Corrado (2009) [70] utilizou esta abordagem para identificar fatores-chave na classificação energética de uma habitação em Itália.

4.4. Métodos ‘variance-based’ e ‘meta-modelling’

O método de ‘variance-base’ é utilizado para decompor a incerteza de um conjunto de resultados face às variáveis de entrada correspondentes. Este método apresenta duas medidas principais de sensibilidade: os efeitos de primeira ordem e os efeitos totais. Os efeitos de primeira ordem consideram os principais efeitos derivados da variância dos resultados face a um dado fator. Os efeitos totais contabilizam as contribuições globais da variância dos resultados face a um fator correspondente. A utilização de um indicador face a outro prende-se com o objetivo do estudo, se por um lado este é o de fixar fatores que não são importantes no modelo energético, o índice de sensibilidade de efeitos totais deverá ser utilizado. Se por outro, o propósito é avaliar medidas de eficiência energética, o índice de efeitos de primeira ordem será uma melhor opção [71].

Por recorrência, os métodos FAST (Fourier Amplitude Sensitivity Test) e de Sobol são os mais utilizados. O primeiro considera somente efeitos não lineares, mas não efeitos de interação entre os fatores, o que não se traduz numa boa abordagem para aplicação deste tipo de métodos. O método de Sobol permite uma decomposição de todas as variâncias dos resultados, o que significa que nenhuma variância dos resultados é excluída da análise. Contudo, o método de Sobol apresenta um custo computacional muito mais elevado quando comparado com outros métodos globais de SA, o que dificulta a sua aplicação neste tipo de estudos.

Na análise do desempenho energético de edifícios, Mechri et al. (2010) [72] implementou o método FAST como modo de identificação dos fatores-chave que afetavam o desempenho térmico de um edifício de escritórios típico em Itália. Shen et al. (2013) [73] aplicou o método FAST, de modo a obter os índices de efeitos de primeira e total ordem, com o intuito de determinar que variáveis de um edifício de escritórios em Filadélfia tinham maior impacto no desempenho térmico e de acesso à iluminação natural do espaço. Kristensen et al. (2016) [54] recorreu ao método de Sobol de modo a averiguar conjuntamente com outros métodos, qual o mais indicado na identificação e classificação das variáveis que mais influenciam os resultados relativos às necessidades de energia anuais de um modelo energético de um edifício.

A utilização de SA por via do método de ‘meta-modelling’ recorre a uma abordagem em duas fases. Primeiramente, o ‘meta-model’ é criado por via de métodos de regressão não paramétricos, que permite

a sua mudança para modelos mais complexos. Seguidamente, os índices de sensibilidade são calculados usando este ‘meta-model’ com base no método ‘variance-based’. A principal vantagem de recorrer a estes modelos é o seu custo computacional face à simulação detalhada de modelos de simulação energética de edifícios. Deste modo, este método pode providenciar índices de sensibilidade mais eficientes quando comparado com o método ‘variance-based’, podendo ainda quantificar a variância dos resultados para diferentes fatores, uma vez que, tem na sua raiz o método de ‘variance-based’.

Os ‘meta-models’ mais comuns em SA são o MARS (Multivariate Adaptive Regression Splines), o ACOSSO (Adaptive Component Selection and Smoothing Operator) e SVM (Support Vector Machine). MARS recorre à combinação de uma regressão spline, de um modelo gradual de montagem e particionamento recursivo [74]. ACOSSO utiliza uma normalização para permitir uma estimação mais flexível dos componentes do modelo em análise [74]. SVM permite a produção de condições fronteira não-lineares pela construção de uma fronteira linear numa versão transformada do espaço de amostra [75].

Em vários estudos são utilizados estes métodos de SA, nomeadamente, De Wilde et al. (2010) [76] recorre ao ‘meta-model’ MARS para avaliar a influência da mudança climática num edifício de escritório no Reino Unido. Por outro lado, Tian et al. (2009) [77] implementou o método ACOSSO de modo a investigar o desempenho energético de lote de edifícios no Reino Unido. Eisenhower et al. (2017) [55] utilizou o método ‘meta-model’ para aceder ao desempenho energético de um edifício multifuncional.

A Figura 4.2 demonstra o processo geral adotado na aplicação dos métodos de SA num modelo de desempenho energético de edifícios.

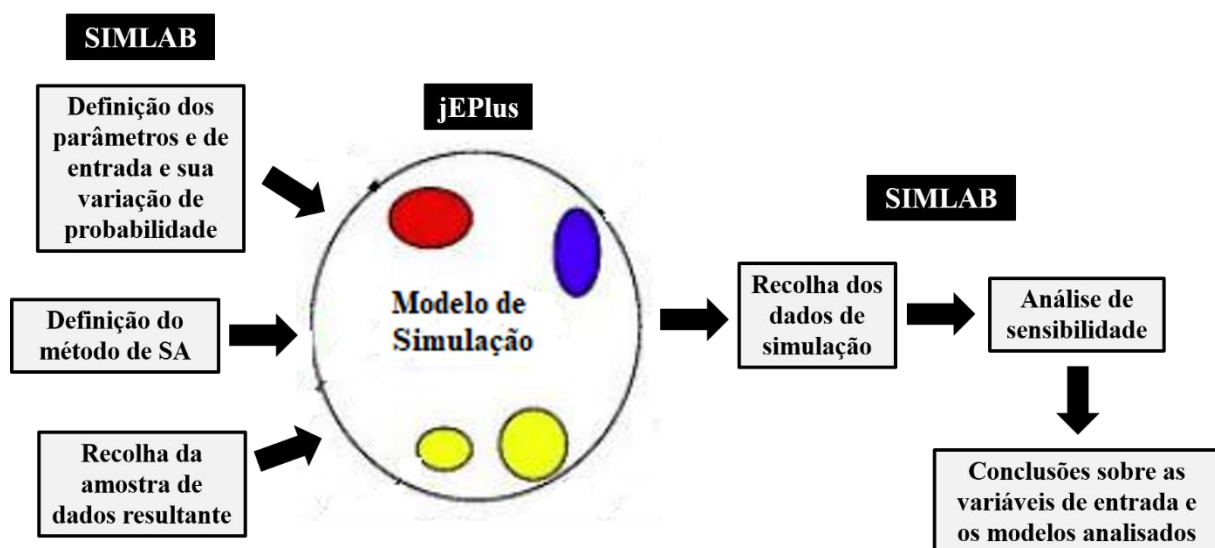


Figura 4.2: Metodologia geral de aplicação dos métodos de SA em modelos de desempenho energético de edifícios.

5. Capítulo 5 – Apresentação e discussão de resultados

5.1. Aspetos gerais

O presente capítulo divide-se em cinco secções que escrutinarão os resultados obtidos do estudo proposto. Na secção 5.1 apresenta-se um breve sumário dos vários pontos abordados no capítulo. A secção 5.2 trata de uma caracterização dos edifícios de escritórios europeus segundo os três métodos apresentados na secção 2.2, e referem-se as conclusões retiradas da análise efectuada nesta secção. Na secção 5.3 é apresentado um sumário das considerações feitas para a simulação energética dos casos de estudo apresentados. A secção 5.4 apresenta uma análise de sensibilidade detalhada da geometria denominada ‘Geometria 2’ segundo a metodologia apresentada na secção 1.4. Na secção 5.5 efetua-se a análise de sensibilidade pelo método de regressão (índice de PCC) e o método de Morris apresentado na secção 4.3, dos restantes casos de estudo.

5.2. Edifícios de escritórios europeus: Caracterização dos aspetos de arquitetura

5.2.1. Aspetos gerais

O estudo de identificação de arquiteturas e soluções solares passivas de edifícios da tipologia de escritórios permitiu verificar que a nível dos relatórios de estudos de níveis ótimos de rentabilidade europeus esta tipologia apresenta poucas variações nos seus aspetos arquitectónicos. Estas edificações apresentam formas de polígonos quadrangulares ou retangulares, com FF elevados, o que suscita a dúvida que as suas proporções não são as mais indicadas para os objetivos de edifícios de baixas necessidades energéticas indicados na diretiva europeia.

A nível de estudos de edifícios de escritórios verifica-se que os modelos utilizados são igualmente de geometrias simples, e sem soluções energéticas adaptadas a edifícios do tipo passivos. A nível de arquitetura esta não difere substancialmente dos modelos de edifícios dos EM, contudo, verifica-se a introdução de edifícios contendo átrios centrais, anexos ou semi-fechados que foram escrutinados nos estudos apresentados na secção 5.2.3.1. Deste modo, tornou-se útil estudar a influência deste tipo de construções no desempenho energético dos modelos dito mais tradicionais, com vista a identificar formas desta tipologia de construções mais suscetíveis de edifícios nZEB.

Por último, evidenciou-se edificações novas existentes no parque de edificado português, e verificou-se que as suas características geométricas são semelhantes às restantes já estabelecidas, não se incluindo modelos de edifícios por esta via de informação.

5.2.2. Método 1 – “Edifício Teórico”

Os relatórios dos estudos de custo-ótimo elaborados pelos EM no âmbito da diretiva 2010/31/EU [4], e posterior regulamento delegado N.º 244/2012 [14], apresentaram uma caracterização do seu parque edificado com recurso a um ER representativo de cada uma das tipologias existentes.

Na aplicação deste método, recolheu-se informação dos 28 relatórios disponíveis [8] onde somente 13 dos mesmos apresentam uma caracterização da tipologia de edifícios de escritórios segundo o quadro metodológico indicado pelo regulamento delegado [14]. Esta recolha de informação permite inferir os três tipos de edifícios mais comuns, com especial foco nos parâmetros geométricos e de envolvente, mas igualmente, com alguma descrição relativamente à componente de sistemas e ocupação dos edifícios.

Nesta análise, procura-se identificar os parâmetros e características relevantes identificados no Capítulo 3, de forma a caracterizar o potencial de comportamento passivo.

No que diz respeito à forma dos edifícios de escritórios de referência definidos nestes relatórios, maioritariamente pode-se inferir que estes apresentam uma geometria de polígono quadrada ou retangular, com uma variação de FF e WWR, respetivamente apresentadas na Figura 5.1.

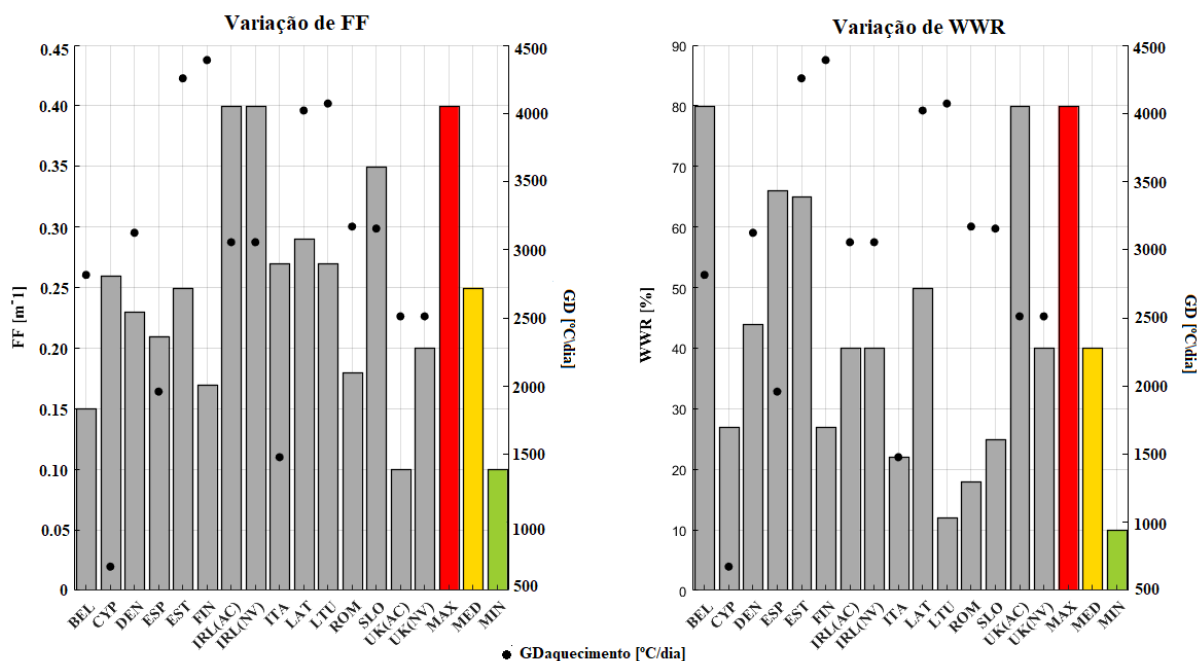


Figura 5.1: Variação de FF e WWR dos edifícios de referência de escritórios apresentados nos relatórios nacionais no âmbito da EPBD, com os respetivos valores de GD_{aquecimento} de cada localização.

Na Figura 5.1 pode-se verificar valores de FF em média entre 0.20 e 0.30, o que revela um tipo de geometrias com proporções pouco compactas e adaptadas a um tipo de arquitetura solar passiva. Verifica-se igualmente que os modelos de referência de cada país não se encontram plenamente adaptados às suas condições climáticas, com países como a Irlanda, a Eslovénia ou a Roménia com elevados valores de FF e evidenciando um clima predominantemente com um número elevado de GD_{aquecimento}. Ou países como o Chipre ou Itália que detém condições climáticas de domínio de arrefecimento, e apresentam valores de FF elevados. Estas condições climáticas apelariam a arquiteturas com os menores valores de FF possíveis, de modo, a uma otimização da eficiência energética da construção desde o período de projeto inicial.

Os valores de WWR adotados, são na generalidade dos países moderados e adequados à predominância das necessidades de aquecimento, arrefecimento e iluminação, com valores médios entre 30% a 40%.

O coeficiente de transferência de calor (U) dos elementos da envolvente opaca apresenta um valor médio de U de 0.46 W/(m²K) para as paredes exteriores, 0.42 W/(m²K) para a cobertura, 0.33 W/(m²K) para o pavimento e 2.00 W/(m²K) para os vãos envidraçados. Os valores de U_{global} da envolvente opaca para os países analisados são obtidos pela equação (5.1) e apresentados Figura 5.2.

$$U_{\text{global}} = \frac{\sum_{i=1}^n U_n A_n}{A_{\text{total}}} \left[\text{W}/(\text{m}^2\text{K}) \right] \quad (5.1)$$

Em que:

- A_{total} – Área total das superfícies consideradas no espaço em análise [m²].

Na Figura 5.2 verifica-se que face à dominância de condições climáticas mais propícias ao domínio necessidades de aquecimento (elevado número de GD_{aquecimento} das localizações), como por exemplo nos locais Finlândia, Estónia, Eslováquia, Lituânia e Reino-Unido, os valores de U da envolvente são menores. Noutras localizações como Espanha e Chipre verifica-se uma menor concordância dos valores de U com as condições climáticas, pois estes deveriam ser menores face às maiores necessidades de arrefecimento que os espaços nestas localizações por norma apresentam.

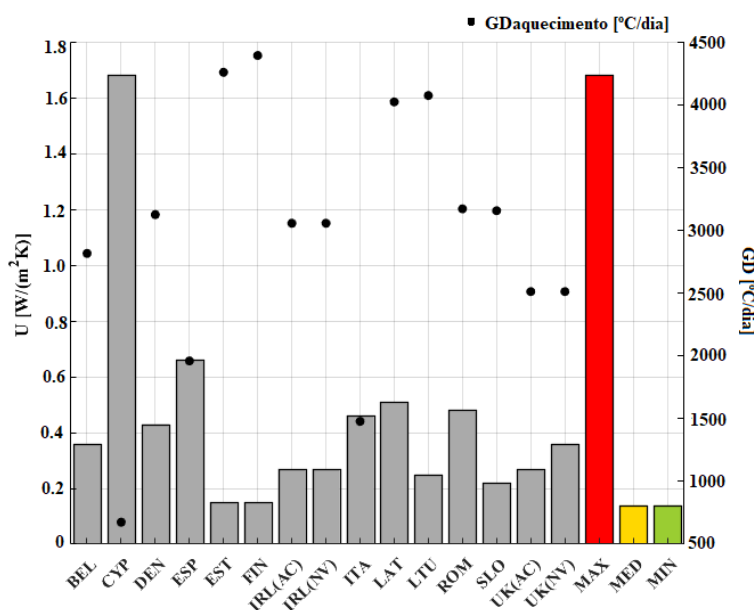


Figura 5.2: Variação do valor de U_{global} da envolvente opaca dos edifícios de referência de escritórios apresentados nos relatórios nacionais no âmbito da EPBD, com os respetivos valores de GD_{aquecimento} de cada localização.

No que diz respeito ao sombreamento dos edifícios, nos presentes relatórios nem todos os modelos de referência detalham essa componente. Os aspetos de sistemas e operação do edifício apresentam várias lacunas de caracterização nos relatórios nacionais analisados, o que dificulta uma correta sistematização da informação. Contudo, dado o presente estudo somente se focar nos aspetos de arquitetura e envolvente dos modelos de edifícios esta lacuna não apresenta uma problemática no desenvolvimento da investigação.

É ainda relevante analisar a variação do valor de IEE dos modelos apresentados nos relatórios. Este indicador pode ser obtido com recurso à equação (3.9). Com a limitação deste indicador para valores cada vez menores, é possível melhorar a quantificação do estado de eficiência energética das construções e a respetiva aplicação de medidas nos edifícios, com o intuito de atingir os objetivos dos regulamentos europeus.

Através da Figura 5.3 verifica-se que nos edifícios de escritório de referência europeus, à data de 2013, em média a sua maioria ainda apresentava um indicador de eficiência energética elevado. Este facto indica que a maioria dos modelos de edifícios europeus de referência, ainda se encontra longe do objetivo de construções de elevado desempenho energético como desejável. Esta situação limita um eventual aumento na exigência das políticas nacionais de implementação de medidas de eficiência energética, que levem à concretização do objetivo descrito para o setor na diretiva europeia.

Não obstante, os relatórios nacionais relativos ao ponto de situação de implementação da diretiva de 2016 [8], indicam que a maioria dos países europeus tem apresentado alguns objetivos relativos ao aumento da exigência na eficiência energética do setor, nomeadamente, países como a Dinamarca, Reino Unido e Finlândia.

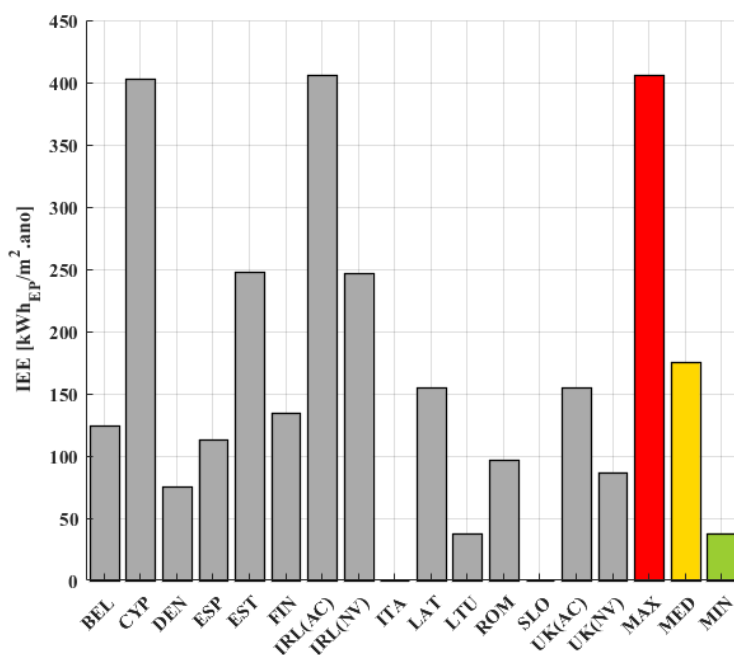


Figura 5.3: Variação do valor de IEE dos modelos de edifícios de referência de escritórios apresentados nos relatórios nacionais no âmbito da EPBD².

Com a análise aos dados dos relatórios foi possível realizar uma seleção das geometrias representadas esquematicamente na Figura 5.4 com as características geométricas apresentadas na Tabela 5.1. A configuração interior do edifício diz respeito a uma configuração modelo típica adotada nos estudos de edifícios de escritórios [78].

² Fator de conversão de energia elétrica em energia primária [8]: BEL (2.5), CYP (2.7), DEN (2.5), ESP (2.6), EST (2.0), FIN (1.7), IRL (2.2), ITA (2.0), LAT (1.5), LTU (), ROM (2.6), SLO (2.5), UK (1.8).

Tabela 5.1: Características geométricas dos modelos de edifícios mais comuns retirados dos relatórios nacionais no âmbito da EPBD³.

Edifício	Geometria 1	Geometria 2	Geometria 3
Comprimento [m]	55	50	30
Largura [m]	55	22	16
Altura [m]	36	21	13
Número de pisos	10	6	4
Pé-direito [m]	3.6	3.5	3.3
Área total de pavimento [m²]	30000	1100	1920
Área de cobertura [m²]	3025	1100	480
Área de pavimento [m²]	3025	6600	480
Área de fachada [m²]	8008	3024	1196
Volume [m³]	110110	23100	6240
Escritórios Norte e Sul			
Comprimento [m]	55	50	30
Largura [m]	12.5	6	5
Escritórios Este e Oeste			
Comprimento [m]	30	10	6
Largura [m]	10	10	6
Zona Central			
Comprimento [m]	30	18	8
Largura [m]	10	10	6
WWR [%]	80	27	27
Fator de Forma [m⁻¹]	0.12	0.23	0.35

³ A secção da Tabela 5.1 referida como Escritórios Norte e Sul, e Escritórios Este e Oeste correspondem às respetivas orientações das fachadas destes espaços.

Edifícios de escritórios de baixas necessidades de energia –
Contributo da arquitetura e soluções passivas para soluções de custo-ótimo.

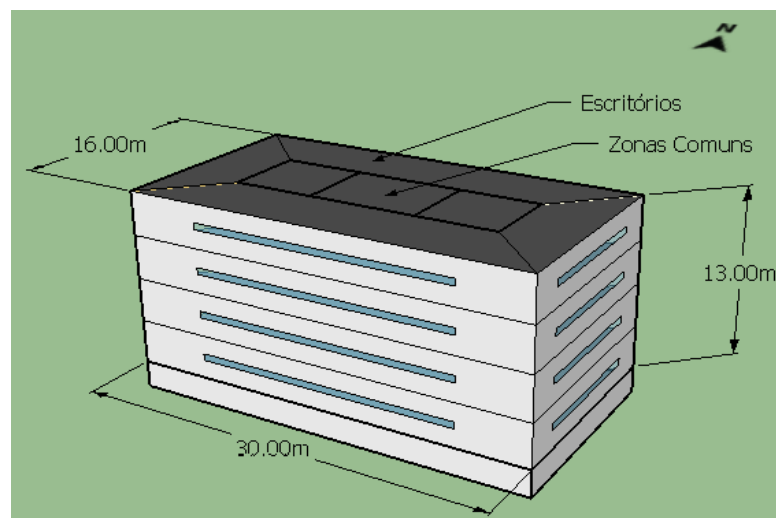
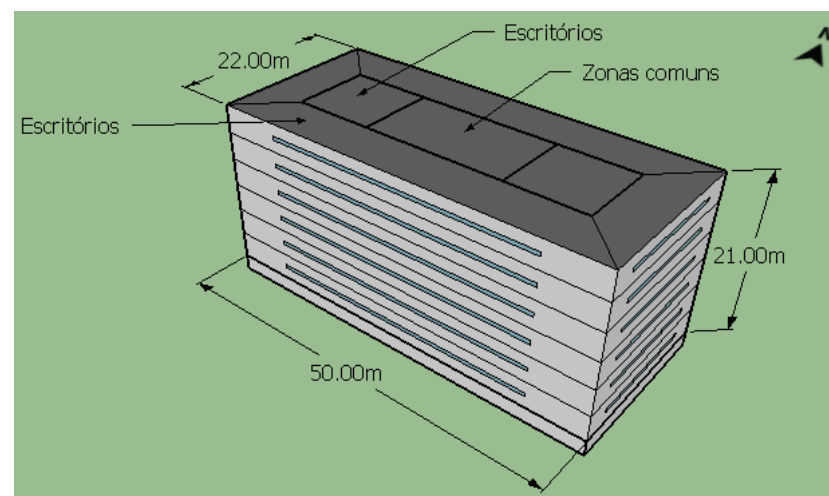
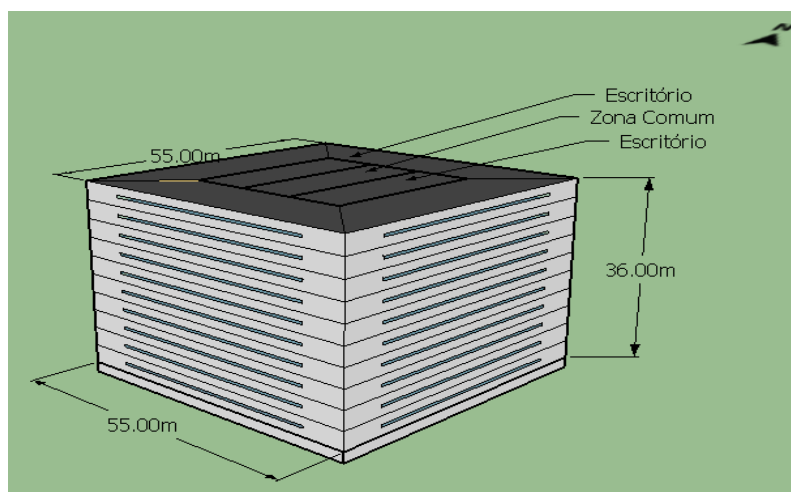


Figura 5.4: Modelos de edifícios teóricos – Geometria 1 (FF = 0.12) (Em cima, à esquerda), Geometria 2 (FF = 0.23) (Em cima, à direita) e Geometria 3 (FF = 0.35) (Em baixo, ao centro) [92].

5.2.3. Método 2 – “Edifício Exemplo”

Neste método recorre-se a informação disponível em vários estudos científicos no âmbito do desempenho energético de edifícios de escritórios a nível europeu e internacional, para recolha de informações acerca de modelos de edifícios de escritórios. Os modelos virtuais verificados nos estudos são resultado da análise de diversos investigadores sobre o parque de edificado onde o seu caso de estudo se encontra situado, ou tem fundamento em modelos de construções desenvolvidos por entidades de investigação ou governamentais com base nas características mais comuns de um dado parque imobiliário de um país ou região [68], [71], [79]–[87].

Na análise efetuada aos vários estudos existentes no referido âmbito, foi possível a identificação de duas geometrias recorrentes. Um modelo que assenta numa forma de polígono regular, quadrangular ou retangular, e outra numa forma de átrio, que poderá ser exterior ou interior, como se exemplifica na Figura 5.5. Dado esta arquitetura de átrio apresentar um potencial passivo relevante, e não se enquadrar em nenhum dos estudos de custos ótimos, a sua parametrização é efetuada na secção seguinte.

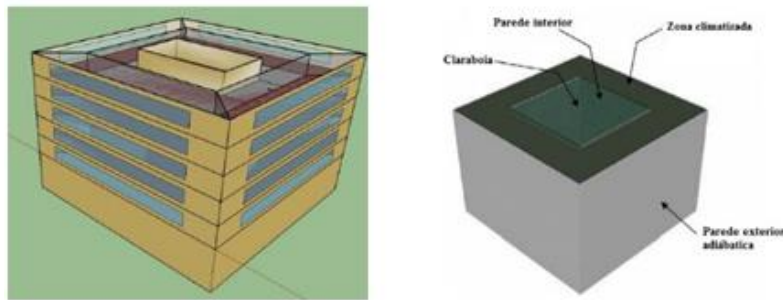


Figura 5.5: Geometria em forma de polígono (à esquerda) [48] e geometria em forma de átrio (à direita) [85].

5.2.3.1. Modelos de edifícios em forma de átrio

Pela análise da literatura científica verificou-se em alguns estudos [78], [82]–[85] a utilização de uma geometria em forma de átrio. No caso do estudo efetuado por Hamdy et al. (2013) [82], que verificou a influência deste tipo de forma do edifício e a sua influência no desempenho energético do mesmo, ou os estudos efetuados por Mohsenin et al. (2015) [68] e Tabesh et al. (2015) [87] que avaliaram os mecanismos de ventilação e desempenho da iluminação natural, respetivamente, nesta tipologia de geometrias.

Estes estudos revelaram que determinadas formas de átrios, combinadas com certos tipos de coberturas, podem melhorar o desempenho energético de um edifício através da redução das suas necessidades de aquecimento e arrefecimento. Du et al. (2010) [88] no seu estudo de foco nos tipos e área de vãos envidraçados, na forma da claraboia, e no tipo de átrio e sua interação com os espaços adjacentes em climas frios, pôde concluir que as claraboias inclinadas aumentam o fator de ganhos solares em 25% para átrios fechados e em 10% em átrios triangulares por comparação com átrios abertos e planos. Este ainda verificou que uma redução na área de superfície dos vãos envidraçados em 50%, poderia impor uma redução em mais de 48% nas necessidades de energia para arrefecimento e totais da construção [88].

Por sua vez, Aldawoud (2013) [85] recorrendo à ferramenta de simulação DOE-2.1 [89] verificou qual o desempenho térmico de uma geometria de átrio quadrada ou retangular de acordo com as condições climáticas, o tipo de vão envidraçado e a sua relação entre comprimento e largura. Os resultados do seu estudo evidenciaram que o consumo energético de um átrio estreito e alongado ou de um átrio retangular com uma elevada relação entre o seu comprimento e largura é significativamente maior que uma forma de átrio quadrada [85].

Deste modo dado a semelhança encontrada entre os edifícios da literatura científica e os dos relatórios nacionais, torna-se útil o estudo da influência de uma geometria em forma de átrio na definição de ER da tipologia de edifícios de escritórios, e consequentemente nas soluções de custo-ótimo. Igualmente, este formato de geometria poderá corresponder a uma vantagem nos aspetos de uma arquitetura solar passiva, que se assemelham mais às características de edifícios com necessidades muito baixas de energia.

Para a conceção de um edifício virtual com uma geometria em forma de átrio, de forma a permitir o estabelecimento de uma futura comparação, recorreu-se às dimensões da ‘Geometria 2’ retirada dos regulamentos nacionais, dimensionando um modelo com a mesma área total de pavimento desta geometria, mas contendo um átrio interior. Dada a informação de estudos que recorreram a geometrias com forma de átrio, nomeadamente o de Hung (2003) [90], verificou-se que as formas mais usuais são as que utilizam um átrio central, anexo ou semi-fechado, respetivamente representados na Figura 5.6, com diferentes tipos de cobertura.

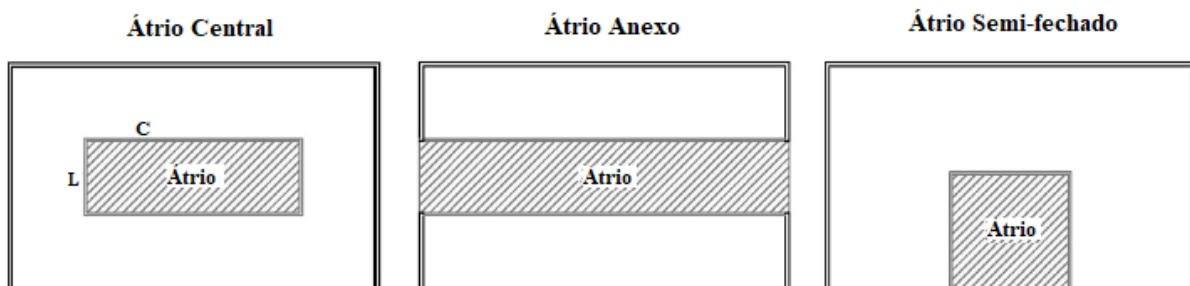


Figura 5.6: Geometrias em forma de átrio [90].

Neste estudo apenas se abordará a influência da utilização de um átrio anexo ou semi-fechado com uma cobertura plana, do tipo claraboia. Esta opção deve-se ao estudo que Mohsenin et al. (2015) [68] realizou, que analisou o desempenho energético da iluminação natural em edifícios com os três tipos de átrios referidos e três tipos de coberturas diferentes baseado numa modelação das condições climáticas. Este verificou que uma claraboia plana num átrio anexo ou semi-fechado são que os permitem obter um melhor desempenho desta componente, contudo qualquer uma das geometrias de átrio permitirá uma boa disponibilidade de luz natural nos espaços interiores.

Dado que o fator de maior importância neste tipo de arquitetura é a iluminação natural, o seu desempenho incrementa alguma complexidade ao design destes edifícios, dependendo sobretudo da sua orientação e geometria, dos tipos paredes e pavimento, e da natureza da cobertura e dos vãos envidraçados aplicados. Assim sendo, a correta proporção de um átrio irá determinar a quantidade de luz natural direta que atinge o pavimento, sendo que átrios largos, baixos e quadrados apresentam um melhor desempenho que átrios profundos, estreitos e retangulares [91].

Deste modo, para a incorporação de uma geometria em forma de átrio neste modelo de edifício exemplo, dimensionou-se primeiramente as proporções dos espaços correspondentes à zona de escritórios, e somente o espaço restante se admitiu com a configuração de um átrio. Recorrendo a uma regra de proporção que dita que a profundidade adequada de uma sala corresponde desde 2 a 2.5 vezes a altura da sua janela até ao pavimento [91], foi possível obter a profundidade adequada dos referidos espaços nestas geometrias.

As geometrias dos modelos de edifício exemplo em forma de átrio a serem consideradas no presente estudo são as indicadas na Tabela 5.2 e apresentadas na Figura 5.7 e Figura 5.8. O fator de WWR não indicado será parametrizado na simulação a efetuar para rácios de 10%, 40% e 80%, segundo a opção tomada face ao verificado nos modelos de edifícios de escritórios de referência europeus.

Tabela 5.2: Características geométricas dos edifícios exemplo com geometria em forma de átrio.

Edifício	GA1	GA2
Comprimento [m]	50	50
Largura [m]	22	22
Altura [m]	21	21
Número de pisos	6	6
Pé-direito médio [m]	3.5	3.5
Área total de pavimento [m²]	6600	6600
Área de cobertura [m²]	1100	1100
Área de pavimento [m²]	1100	1100
Área de fachada [m²]	3024	3024
Volume [m³]	23100	23100
Fator de Forma [m⁻¹]	0.23	0.23
Átrio		
Comprimento [m]	50	20
Largura [m]	6	14
Altura [m]	21	21
Área pavimento do átrio [m²]	300	280
Fator de Forma (excluindo o átrio) [m⁻¹]	0.17	0.22

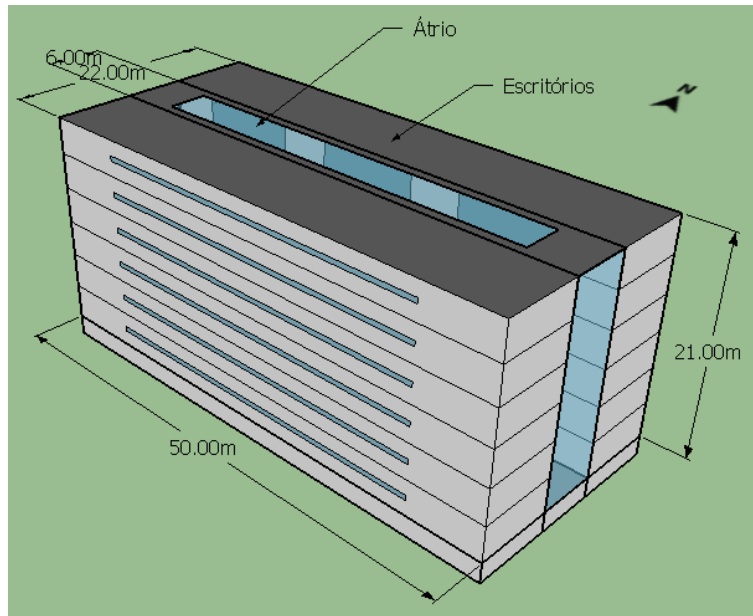


Figura 5.7: Modelo de edifício em forma de átrio 1 (FF = 0.23) – GA1 da Tabela 5.2 [92].

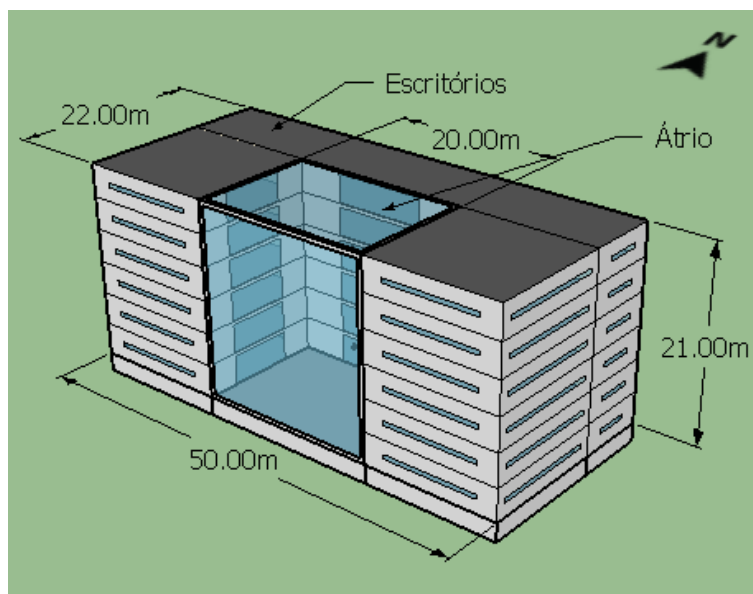


Figura 5.8: Modelo de edifício em forma de átrio 2 (FF = 0.23) - GA2 da Tabela 5.2 [92].

5.2.4. Método 3 – “Edifício Real”

Este método não foi aplicado em nenhum dos estudos de custo-ótimo. Nesse sentido, neste estudo, procedeu-se ao levantamento das geometrias de edifícios de escritórios da cidade de Lisboa, com recurso à ferramenta de medição do Google Earth⁴ [93]. Nesse âmbito, foi selecionada a zona do parque Expo construída em grande parte no final da década de 90 e início dos anos 2000, que apresenta uma elevada concentração de edifícios de escritórios de construção recente em Portugal.

⁴ Esta forma de medição embora não se verifique ser a mais exata, é a possível dado a impossibilidade de obter as plantas destes edifícios, pertencentes a entidades privadas ou governamentais.

Deste modo, caracterizou-se em termos geométricos o edifício A do Campus da Justiça (Figura 5.10) construído entre 2002 e 2008, para o qual se obteve um FF de 0.20 e um valor de WWR de 50%. A escolha recaiu nesta geometria devido ao seu aspeto de polígono regular. Igualmente, caracterizou-se o edifício administrativo da sociedade parque Expo98 (Figura 5.10) por apresentar uma geometria que inclui um átrio interior, para o qual se obteve um FF de 0.10 e um WWR de 48%. Por último, o edifício sede da Vodafone (Figura 5.10) devido a sua forma geométrica pouco comum foi sujeita à uma caracterização obtendo-se um FF de 0.10 e um WWR de 10%.

Dado os valores de FF e WWR verificados para estas construções recentes e o seu aspeto geométrico se enquadrarem nas geometrias definidas anteriormente, nas secções 5.2.2 e 5.2.3, não se justifica a conceção de um ER segundo este método. Por outro lado, os dados destes três edifícios contribuíram para uma maior “confiança” nas arquiteturas anteriormente identificadas.

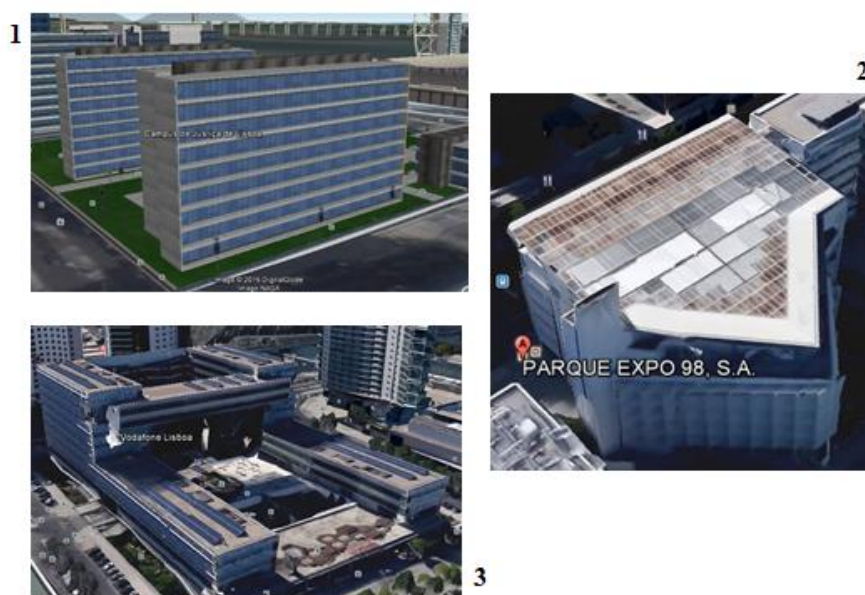


Figura 5.9: Edifícios reais analisados – 1: Edifício A do Campus da Justiça; 2 – Edifício de gestão do Parque das Nações; 3- Edifício Sede da Vodafone – Parque das Nações (GoogleEarth).

5.2.5. Notas conclusivas

A caracterização dos edifícios de escritórios europeus por cada um dos três métodos apresentados nas secções 5.2.2, 5.2.3 e 5.2.4, permitiu efetuar um levantamento das formas de edifícios desta tipologia mais comuns. Da mesma forma esta sumarização facilitou a identificação dos casos de estudo que se justificaria adotar no âmbito da presente dissertação.

De forma a minimizar incorreções no estabelecimento das geometrias, e de se verificar que o método 3 não acrescentava novas arquiteturas às identificadas nos métodos 1 e 2, optou-se por não considerar casos de estudo deste método.

No que diz respeito ao método 1, e dado corresponder aos dados geométricos mais fiáveis disponíveis, adotaram-se três casos de estudo que correspondem a dois casos extremos de máximo e mínimo em termos de FF e um caso intermédio, respetivamente representados pelos modelos G1, G2 e G3 da Figura

5.4. Uma vez que os dados destes casos de estudo advêm dos relatórios no âmbito da diretiva europeia, e esta não contempla casos de geometrias diferentes de polígonos regulares, ou formas com variantes na envolvente, como claraboias ou sombreamentos, recorreu-se ao método 2.

No método 2 foi possível efetuar a exploração de estudos de edifícios de escritórios. Estes apresentam geometrias de polígono regular, que se verificam como sendo na sua generalidade as mais otimizadas para um incremento no desempenho energético das construções, e ainda, a adoção de modelos de edifícios que satisfazem a condição de edifícios solares passivos, como os edifícios com a componente de átrio apresentados na secção 5.2.3.1. Este tipo de estruturas dispõe de certas características como evidenciadas na secção 3.2 que permitem obter uma melhoria nas contrariedades relativas à ventilação e iluminação natural que um edifício dito regular apresenta.

A adição de dois casos de estudo representados pelas geometrias da Figura 5.7 e Figura 5.8 por via do método 2, permite estabelecer uma comparação entre as opções exploradas pelos EM nos seus relatórios face a outro tipo de arquiteturas que podem servir como ER.

5.3. Aspetos gerais do estudo de simulação

A recorrência a uma ferramenta de simulação energética de edifícios como o EnergyPlus [9], ou outros, possibilita averiguar teoricamente o desempenho energético de um edifício. Para que o processo de simulação possa decorrer é necessário estabelecer as características gerais do modelo de edifício a analisar, nomeadamente:

- Dados geométricos (dimensões da estrutura, dimensões dos vãos envidraçados, localização, condições climáticas);
- Dados de envolvente (materiais de construção da envolvente opaca e não-opaca, dispositivos de sombreamento, infiltrações);
- Dados de sistemas energéticos (sistemas de aquecimento e arrefecimento, sistemas de AQS);
- Dados de operação (ocupação, iluminação, EE).

Esta caracterização pode ser mais ou menos detalhada mediante o utilizador que se encontra a efetuar o estudo de simulação, e a informação disponível ou definida acerca da construção.

Na presente dissertação caracterizaram-se os dados acima referidos que possibilitam a realização da simulação energética dos casos de estudo referidos na secção 5.2. A escolha baseou-se tanto nos dados disponíveis nos relatórios europeus, como no conhecimento e pesquisa sobre as características de construção europeias, em particular, em Portugal. Na Tabela 5.3 encontra-se sumariadas todas as variáveis que foram parametrizadas no presente estudo, e nas secções 5.3.1 - 5.3.4 é apresentada a síntese das opções tomadas para a simulação energética dos casos de estudo.

Tabela 5.3: Parâmetros em estudo nos casos de estudo apresentados.

Parâmetro	Legenda	Unidade	Valor	Probabilidade
Fator de forma do edifício	FF	m ⁻¹	0.12/0.23/0.35	Discreta
Fracção de área envidraçada na envolvente opaca	WWR	%	10/40/80	Discreta
Espessura de isolamento da parede exterior	isoPE	m	0/0.02/0.04/0.07/0.10/0.15/0.20/0.25/0.30/0.35	Uniforme
Espessura de isolamento da cobertura	isoCOB	m	0/0.02/0.04/0.07/0.10/0.15/0.20/0.25/0.30/0.35/0.40	Uniforme
Espessura de isolamento do pavimento [Em contacto com o solo]	isoPAV	m	0/0.10/0.20	Uniforme
Coefficiente de transferência de calor do vão envidraçado	U _{vão}	W/m ² K	1.6/2.8/3.3	Uniforme
Fator solar do vão envidraçado	g	Adimensional	0.14/0.26/0.29/0.40/0.47/0.59/0.87	Uniforme
Transmitância do vão envidraçado	τ _{vão}	Adimensional	0.12/0.43/0.34/0.36/0.45/0.61/0.81	Uniforme
Iluminação dos espaços de trabalho	Iluminação	W/m ²	9.26/5.60	Discreta
Ocupação dos edifícios	Ocupação	m ² /pessoa	7.5/15	Discreta
Equipamentos Elétricos	EE	W/m ²	7.5/15	Discreta
Absortância solar das superfícies exteriores da envolvente opaca - Parede Exterior e Cobertura	α _{sup}	Adimensional	0.4/0.8	Discreta
Sombreamento dos vãos envidraçados	Sombreamento	Adimensional	Exterior/Interior	Discreta
Caudal de ventilação natural	RPH	h ⁻¹	2/5/10	Discreta

5.3.1. Geometria – Localização e orientação

Como referido na secção 3.2.1, a localização e orientação de uma construção apresenta um peso considerável no seu desempenho energético. E dado o objetivo de um edifício ser a proteção dos seus ocupantes face às condições ambientes exteriores, proporcionado ambientes mais confortáveis para estes desenvolverem as suas atividades. No âmbito deste trabalho torna-se pertinente o confronto de resposta energética da geometria das construções em condições climáticas distintas.

No mapa de Köppen-Geiger [94] apresentado na Figura 5.11, é possível verificar a diferença de condições climáticas nas diferentes regiões da Europa. A análise deste recurso possibilitou a opção de localizar os casos de estudo em Lisboa (Portugal) que segundo a classificação dada por Köppen-Geiger apresenta um clima Csa (ou seja, um clima de dominância quente, com verões secos e quentes), face a uma localização em Helsínquia (Finlândia) que apresenta um clima Dfb (ou seja, um clima de dominância fria, mas com verões quentes e húmidos). A Figura 5.10 evidencia o referido, com a representação da variação da temperatura anual nas duas localizações em estudo.

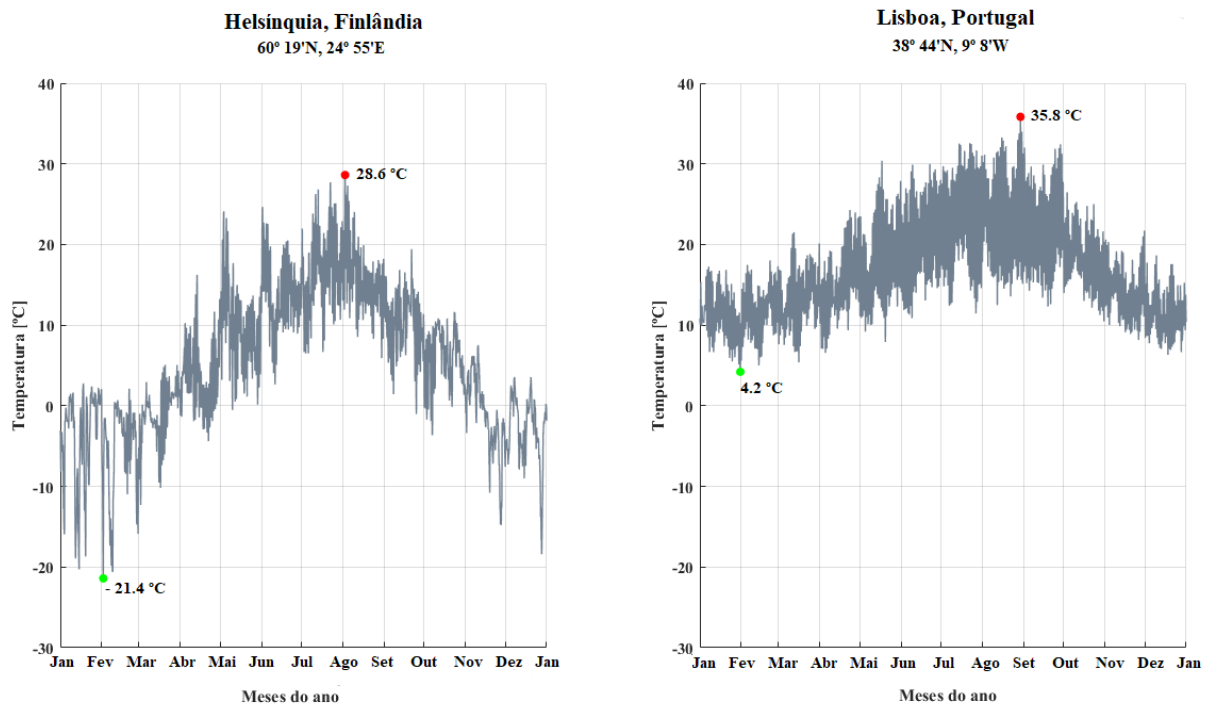


Figura 5.10: Variação de temperatura anual nas duas localizações em estudo: Helsínquia, Finlândia e Lisboa, Portugal.
[Fonte: ficheiro climático EnergyPlus [9]].

No que diz respeito à orientação das construções, adotou-se a orientação sul para todos os casos de estudo e nas duas localizações. Esta opção deve-se a ser esta a orientação escolhida nos relatórios europeus dos ER estudados, e igualmente, por se ter verificado pelo programa EnergyPlus que esta orientação seria a que proporcionaria melhor desempenho energético dos edifícios.

No que diz respeito aos dados geométricos, estes já se encontram sumarizados na Tabela 5.1 e Tabela 5.2. A variação do parâmetro FF, que dá origem aos cinco casos de estudo referenciados permite assim inferir a influência do formato da construção no seu desempenho energético. Em adição será possível inferir se variáveis geométricas como a área de pavimento útil, o número de pisos e a profundidade dos espaços detêm algum peso na componente energética do edifício. As construções em estudo apresentam todas uma zona denominada de “Garagem”, num nível inferior ao piso térreo com 2.5m de altura.

Importa referir que o parâmetro de WWR será objeto de parametrização no estudo, tomando o valor de 10%, 40% e 80% de cada uma das fachadas das construções, com exceção, dos modelos de edifício átrio que apresentam uma maior fachada envidraçada na superfície que contém os vãos para os espaços de átrio.

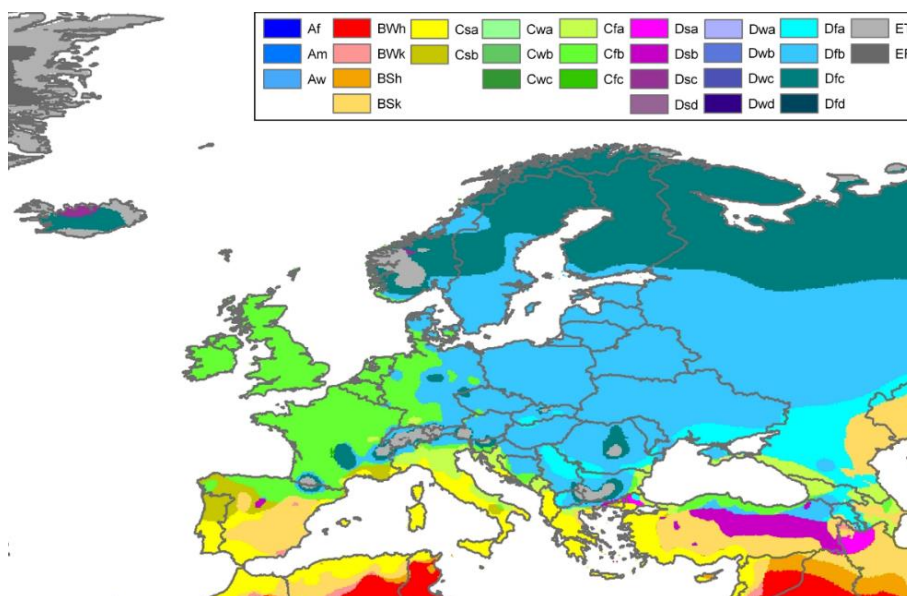


Figura 5.11: Mapa de Köppen-Geiger na zona da Europa e legenda da classificação climática [94].

5.3.2. Envolvente

No que diz respeito ao tipo de envolvente opaca das construções, adotou-se a presente no relatório europeu de Itália [8], por ser a que continha informações mais detalhadas nesta componente comparativamente com os restantes relatórios analisados. Os dados relativos às soluções construtivas de parede exterior, parede interior, cobertura, pavimento térreo e pavimento interior aplicadas encontram-se na Tabela A.3.

Nesta componente procedeu-se à variação da espessura de isolamento aplicada dentro de uma gama de valores apresentados na Figura 5.12 para as superfícies de parede exterior, cobertura e pavimento. Esta opção foi tomada, uma vez que, é a espessura de isolamento de uma solução construtiva que mais influência preponderantemente o valor de U da mesma, e deste modo, o desempenho térmico de uma construção. Igualmente, variou-se a absorvância (α_{sup}) dos materiais exteriores das soluções construtivas de parede exterior e cobertura por forma, a verificar se a cor clara ($\alpha_{sup} = 0.4$) ou escura ($\alpha_{sup} = 0.8$) do edifício influenciava o seu desempenho energético.

Em relação à envolvente não-opaca, por forma a estudar tanto a influência de U do vão envidraçado, como do seu fator solar e transmitância, selecionou-se uma gama de vidros que apresentavam características distintas em relação à sua função (vidro de controlo solar, vidro de baixa emissividade, vidro ‘standard’), ou cor (incolor, cinzento, azul). A gama de vidros escolhida encontra-se na Tabela A.5 contudo esta gama sofre alterações na aplicação dos métodos de SA, passando a ser a gama de vãos envidraçados apresentada na Tabela A.6.

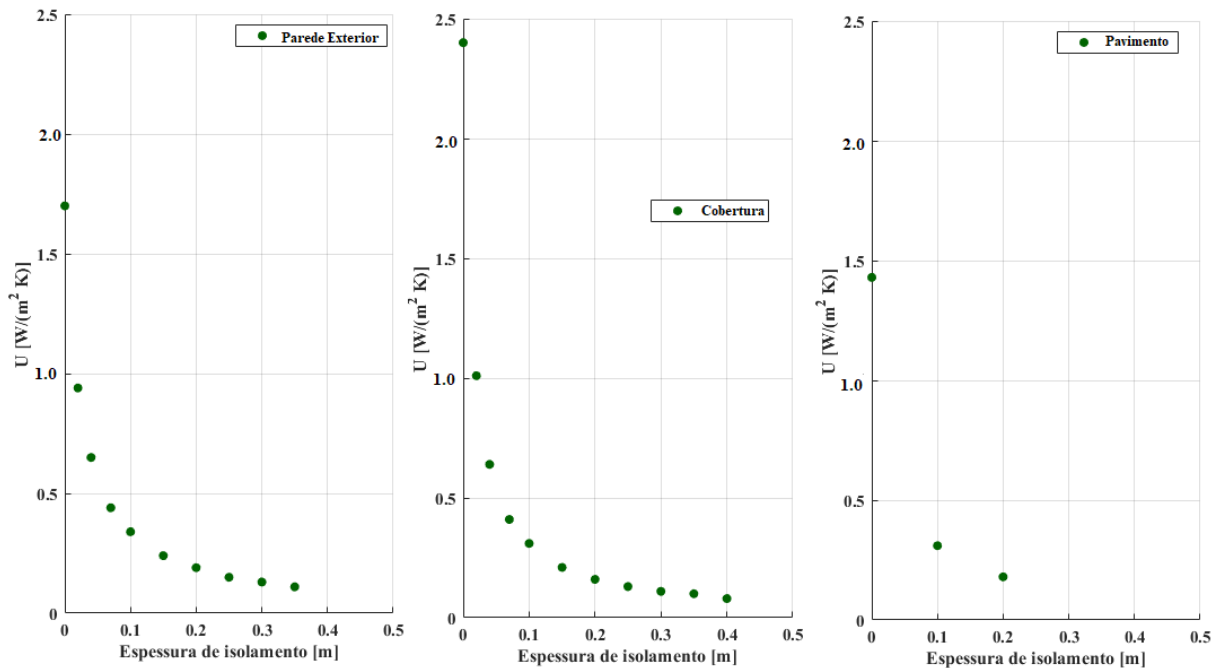


Figura 5.12: Variação do valor de U das soluções construtivas das superfícies opacas em função da variação da espessura de isolamento das mesmas.

No presente estudo estudo-se ainda o efeito dos dispositivos de sombreamento utilizando dois tipos, sombreamento exterior (SE) do tipo estore veneziano, e sombreamento interior (SI) do tipo persiana enrolável.

Por último, definiu-se o valor do caudal de infiltração de ar dos espaços do edifício devido às frinchas na envolvente. Recorreu-se à classificação relativa à permeabilidade do ar de referência da caixilharia de janelas apresentada por Clérigo (2014) [95], e assumindo que as janelas do edifício são de classe 3, estas apresentam uma permeabilidade de $9 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$ a 100 Pa de diferença de pressão. Para cada percentagem de WWR adotada nos diferentes modelos de edifícios, os valores de infiltração dos espaços utilizados são os apresentados na Tabela A.11.

5.3.3. Sistemas energéticos

Os sistemas energéticos adotados nos presentes casos de estudo destinam-se somente às funções de suprir as necessidades de aquecimento ou arrefecimento, e de ventilação dos espaços.

Para tal efetuou-se a simulação recorrendo ao objeto do EnergyPlus “*HVACTemplate:Zone:IdealLoadsAirSystem*”, que simula um sistema de aquecimento ou arrefecimento ideal, ou seja, que virtualmente permite suprir sempre as necessidades destas cargas. Os resultados do consumo energético desta componente sofrem após a simulação um pós-processamento segundo o referido na secção 3.3.1, de modo a conhecer-se o consumo efetivo da bomba de calor associada ao sistema HVAC (Heating, Ventilation and Air-Conditioning) simulado.

A recorrência ao sistema HVAC foi simulada em duas situações distintas:

- Utilização de somente HVAC;
- Utilização de HVAC e Ventilação Natural (VN) (Ventilação Híbrida (VH)).

Esta opção do estudo deve-se ao facto da promoção da ventilação natural para efetuar arrefecimento passivo, quando as condições exteriores permitem esta recorrência. Esta situação pode conduzir a uma redução dos consumos elétricos dos sistemas utilizados, tanto numa via de diminuição das necessidades de arrefecimento como de ventilação dos espaços de modo a manter a renovação dos caudais mínimos de ar novo.

A ventilação natural foi somente usada quando as condições ambientes exteriores o permitiram, ou seja, quando a $T_{ext} < T_{int}$. Em termos de programa de simulação, e após diversos testes dos limites de temperatura adequados, definiu-se as condições abaixo de temperatura mínima interior e exterior para funcionamento deste sistema, permitindo que funcionasse sempre que existisse a diferença de 1°C entre a temperatura interior e exterior:

$$\begin{aligned}T_{int,min} &= 20^{\circ}\text{C} \\ T_{out,min} &= 12^{\circ}\text{C} \\ \Delta T &> 1^{\circ}\text{C}\end{aligned}$$

A otimização do funcionamento do sistema HVAC e de ventilação natural é conseguida recorrendo à definição de horários na ferramenta de simulação, que permitem assim atingir um sistema híbrido, como exemplificado na Figura 5.13, para a localização de Lisboa. A recorrência a estes sistemas só é efetuada no período de ocupação dos espaços, definidos na secção seguinte. Para avaliar a influência desta componente, em regime de ‘free-cooling’, foram considerados três caudais de ventilação de 2, 5 e 10 RPH.

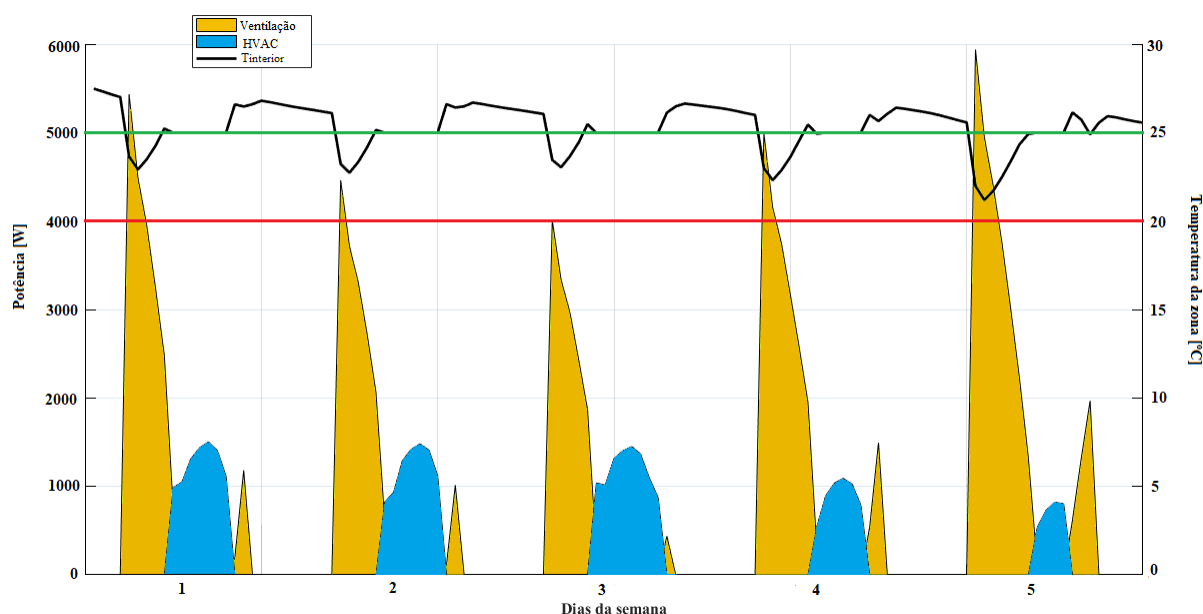


Figura 5.13: Funcionamento do sistema HVAC com a estratégia de ventilação natural, na semana de 3 a 7 de Julho, na localização de Lisboa.

Independentemente do estabelecimento dos caudais acima referidos, que permitem assegurar a ventilação caso as condições ambientes exteriores o permitam, é necessário assegurar em qualquer caso

um caudal mínimo de renovação do ar. Estes valores de caudais são definidos segundo a Portaria nº353-A/2013 [96] do RECS que estabelece os requisitos de ventilação e qualidade do ar interior. Esta define que num espaço de baixa emissão poluente e contendo materiais de baixa emissão poluente, o caudal mínimo de ar novo a ser assegurado é de $2 \text{ m}^3/\text{h}\cdot\text{m}^2$. Na Tabela A.12 apresentam-se os valores de caudal considerado para cada caso de estudo consoante o pé-direito dos espaços ventilados das construções.

5.3.4. Operação

A operação do edifício caracteriza-se pelas suas componentes de ocupação dos espaços, e utilização de iluminação artificial e equipamentos elétricos.

No que diz respeito a ocupação, esta caracteriza-se pelo seu número de ocupantes e respetivos períodos de ocupação dos espaços. Para efeitos de estudo do impacto no desempenho energético consideraram-se dois tipos de ocupação, uma elevada e outra baixa, tomando os valores de $7.5 \text{ m}^2/\text{pessoa}$ e de $15 \text{ m}^2/\text{pessoa}$, respetivamente. O perfil de ocupação horário adotado foi o indicado como o de referência para edifícios de escritórios em Portugal [97] e encontra-se na Tabela A.14, que é bastante semelhante ao verificado nos relatórios dos EM no âmbito da diretiva europeia.

No que respeita à iluminação dos espaços, adotaram-se sempre sistemas de controlo de iluminação natural por uma questão de eficiência energética. Em relação ao dimensionamento da iluminação artificial necessária, por questões de estudo do impacto desta componente variou-se a utilização em dois tipos: iluminação fluorescente compacta (CFL) e iluminação LED (*light-emitting diode*) [98]. Na Tabela A.13 é possível consultar todos os dados referentes ao dimensionamento da iluminação para os dois tipos utilizados, assumindo um *set-point* de 500 lux para os espaços de trabalho/escritórios e de 100 lux para as zonas de passagem e garagem. Os perfis de funcionamento de iluminação são os referenciados igualmente em [97] e apresentados na Tabela A.15.

A utilização dos EE caracteriza-se de modo semelhante à ocupação dos espaços, sendo que no presente estudo se varia a sua potência em dois valores de modo a verificar o impacto desta componente no desempenho energético da construção. Assim adotou-se uma densidade elevada e outra baixa, de $15 \text{ W}/\text{m}^2$ e de $7.5 \text{ W}/\text{m}^2$, respetivamente. O seu perfil de utilização é o referenciado em [97], e apresentado na Tabela A.16.

5.4. Análise detalhada da Geometria 2

5.4.1. Caso de estudo

Para avaliar o impacto das soluções resultantes da parametrização das variáveis em estudo indicadas na Tabela 5.3 e para as duas localizações do caso de estudo, foi realizado um estudo detalhado do modelo G2 apresentado na Figura 5.4, que inclui a simulação de todas as combinações possíveis de parâmetros, correspondendo a 369 600 simulações. Face ao custo computacional, para a análise de SA das outras geometrias foi adotado uma solução alternativa descrita na secção 5.5.

O modelo de edifício denominado ‘Geometria 2’ – G2 (FF = 0.12), encontra-se representado na Figura 5.4, e tem as características geométricas da Tabela 5.1. Neste caso, realizou-se a parametrização do conjunto de variáveis em estudo indicadas na Tabela 5.3.

Relativamente aos valores de custos globais das soluções estes foram obtidos com recurso ao explicitado na secção 3.4, encontrando-se nas Tabela A.4 - Tabela A.9 os custos de investimento, manutenção e a descrição das soluções individuais de componentes da construção aplicadas ao modelo. Na Tabela A.10 encontram-se os custos de energia elétrica e emissões de gases de efeito estufa aplicados no cálculo do custo global do componente apresentado na equação (3.10).

5.4.2. Análise de sensibilidade

A análise de sensibilidade é um método de análise de dados, que permite determinar o efeito da variação de uma variável no resultado final de um parâmetro em estudo. A SA do conjunto de dados resultantes da simulação de variáveis parametrizadas, irá contemplar fundamentalmente, qual o impacto que as variáveis de envolvente do edifício apresentam nas necessidades de energia e no custo global da construção.

Na Tabela 5.4 e Tabela 5.5 são apresentados os resultados numéricos obtidos para as melhores soluções de energia mínima na situação de aplicação de ventilação mecânica (VM) e VH. Estas mesmas serão analisadas com maior detalhe recorrendo ao apoio gráfico das curvas de custo-ótimo.

Importa referir que na SA apresentada o ponto de energia mínima corresponde a solução que apresenta o menor valor de indicador de eficiência energética, e por sua vez, o ponto de custo-ótimo refere-se à solução que evidencia o menor valor de custo global. Contudo, estes pontos não representam o menor valor encontrado no conjunto total de soluções analisadas, mas sim, derivam de uma análise local em torno dos pontos de energia mínima e custo-ótimo que mais se aproximavam das soluções de referência regulamentares e das apresentadas nos relatórios delegados no âmbito da diretiva europeia.

Edifícios de escritórios de baixas necessidades de energia –
Contributo da arquitetura e soluções passivas para soluções de custo-ótimo

Tabela 5.4: Soluções de energia mínima na situação de ventilação mecânica nas duas localizações de estudo.

Soluções de energia mínima - Ventilação Mecânica									
Helsinkia									
Lisboa									
Tipo de sombreamento	WWR [%]	GI	Tipo de iluminação	IEE [kWh/m².ano]	Custo global [€/m²]	Solução Envolvente	IEE [kWh/m².ano]	Custo global [€/m²]	Solução Envolvente
SE	10	Altos	CFL	207.4	613.0	PE=0.25m; COB=0.35m; PAV=0m; Uvão=1.60; g-value=0.26; r=0.43; a=0.8;	212.7	573.0	PE=0.04m; COB=0.10m; PAV=0m; Uvão=1.60; g-value=0.26; r=0.43; a=0.4;
			LED	188.4	664.3	PE=0.35m; COB=0.40m; PAV=0m; Uvão=1.60; g-value=0.26; r=0.43; a=0.8;	195.7	913.4	PE=0.04m; COB=0.10m; PAV=0m; Uvão=1.60; g-value=0.26; r=0.43; a=0.4;
		Baixos	CFL	149.0	613.2	PE=0.25m; COB=0.35m; PAV=0m; Uvão=1.60; g-value=0.26; r=0.43; a=0.8;	142.2	571.3	PE=0.04m; COB=0.10m; PAV=0m; Uvão=1.60; g-value=0.26; r=0.43; a=0.4;
			LED	131.7	903.7	PE=0.35m; COB=0.40m; PAV=0m; Uvão=1.60; g-value=0.26; r=0.43; a=0.8;	122.7	847.1	PE=0.04m; COB=0.10m; PAV=0m; Uvão=1.60; g-value=0.26; r=0.43; a=0.4;
	40	Altos	CFL	203.5	613.3	PE=0.25m; COB=0.35m; PAV=0m; Uvão=1.60; g-value=0.26; r=0.43; a=0.8;	204.9	573.1	PE=0.04m; COB=0.10m; PAV=0m; Uvão=1.60; g-value=0.26; r=0.43; a=0.4;
			LED	189.0	953.7	PE=0.25m; COB=0.35m; PAV=0m; Uvão=1.60; g-value=0.26; r=0.43; a=0.8;	191.2	913.5	PE=0.04m; COB=0.10m; PAV=0m; Uvão=1.60; g-value=0.26; r=0.43; a=0.4;
		Baixos	CFL	147.3	613.7	PE=0.25m; COB=0.35m; PAV=0m; Uvão=1.60; g-value=0.26; r=0.43; a=0.8;	134.3	571.4	PE=0.04m; COB=0.10m; PAV=0m; Uvão=1.60; g-value=0.26; r=0.43; a=0.4;
			LED	134.3	954.3	PE=0.25m; COB=0.35m; PAV=0m; Uvão=1.60; g-value=0.26; r=0.43; a=0.8;	118.5	848.8	PE=0.04m; COB=0.10m; PAV=0m; Uvão=1.60; g-value=0.26; r=0.43; a=0.4;
	80	Altos	CFL	206.1	614.6	PE=0.25m; COB=0.35m; PAV=0m; Uvão=1.60; g-value=0.26; r=0.43; a=0.8;	198.8	573.9	PE=0.04m; COB=0.10m; PAV=0m; Uvão=1.60; g-value=0.26; r=0.43; a=0.4;
			LED	196.3	955.1	PE=0.25m; COB=0.35m; PAV=0m; Uvão=1.60; g-value=0.26; r=0.43; a=0.8;	187.0	913.9	PE=0.04m; COB=0.10m; PAV=0m; Uvão=1.60; g-value=0.26; r=0.43; a=0.4;
		Baixos	CFL	151.7	615.2	PE=0.25m; COB=0.35m; PAV=0m; Uvão=1.60; g-value=0.26; r=0.43; a=0.8;	128.3	572.5	PE=0.04m; COB=0.10m; PAV=0m; Uvão=1.60; g-value=0.26; r=0.43; a=0.4;
			LED	142.3	955.7	PE=0.25m; COB=0.35m; PAV=0m; Uvão=1.60; g-value=0.26; r=0.43; a=0.8;	117.3	912.4	PE=0.04m; COB=0.10m; PAV=0m; Uvão=1.60; g-value=0.26; r=0.43; a=0.4;
SI	10	Altos	CFL	207.5	310.7	PE=0.25m; COB=0.35m; PAV=0m; Uvão=1.60; g-value=0.26; r=0.43; a=0.8;	213.3	269.9	PE=0.04m; COB=0.10m; PAV=0m; Uvão=1.60; g-value=0.26; r=0.43; a=0.4;
			LED	189.7	651.0	PE=0.25m; COB=0.35m; PAV=0m; Uvão=1.60; g-value=0.26; r=0.43; a=0.8;	191.9	609.6	PE=0.04m; COB=0.10m; PAV=0m; Uvão=1.60; g-value=0.26; r=0.43; a=0.4;
		Baixos	CFL	149.4	311.0	PE=0.25m; COB=0.35m; PAV=0m; Uvão=1.60; g-value=0.26; r=0.43; a=0.8;	142.8	268.3	PE=0.04m; COB=0.10m; PAV=0m; Uvão=1.60; g-value=0.26; r=0.43; a=0.4;
			LED	131.8	325.3	PE=0.35m; COB=0.40m; PAV=0m; Uvão=1.60; g-value=0.26; r=0.43; a=0.8;	123.3	608.3	PE=0.04m; COB=0.10m; PAV=0m; Uvão=1.60; g-value=0.26; r=0.43; a=0.4;
	40	Altos	CFL	203.8	311.2	PE=0.25m; COB=0.35m; PAV=0m; Uvão=1.60; g-value=0.26; r=0.43; a=0.8;	206.1	270.1	PE=0.04m; COB=0.10m; PAV=0m; Uvão=1.60; g-value=0.26; r=0.43; a=0.4;
			LED	189.7	651.7	PE=0.25m; COB=0.35m; PAV=0m; Uvão=1.60; g-value=0.26; r=0.43; a=0.8;	192.4	610.6	PE=0.04m; COB=0.10m; PAV=0m; Uvão=1.60; g-value=0.26; r=0.43; a=0.4;
		Baixos	CFL	149.8	311.8	PE=0.25m; COB=0.35m; PAV=0m; Uvão=1.60; g-value=0.26; r=0.43; a=0.8;	137.8	268.5	PE=0.04m; COB=0.10m; PAV=0m; Uvão=1.60; g-value=0.26; r=0.43; a=0.4;
			LED	135.7	326.3	PE=0.35m; COB=0.40m; PAV=0m; Uvão=1.60; g-value=0.26; r=0.43; a=0.8;	121.9	608.6	PE=0.04m; COB=0.10m; PAV=0m; Uvão=1.60; g-value=0.26; r=0.43; a=0.4;
	80	Altos	CFL	207.0	313.2	PE=0.25m; COB=0.35m; PAV=0m; Uvão=1.60; g-value=0.26; r=0.43; a=0.8;	202.5	271.3	PE=0.04m; COB=0.07m; PAV=0m; Uvão=1.60; g-value=0.26; r=0.43; a=0.4;
			LED	197.1	653.8	PE=0.25m; COB=0.35m; PAV=0m; Uvão=1.60; g-value=0.26; r=0.43; a=0.8;	190.3	655.9	PE=0.04m; COB=0.10m; PAV=0m; Uvão=1.60; g-value=0.26; r=0.43; a=0.4;
		Baixos	CFL	152.5	314.1	PE=0.25m; COB=0.35m; PAV=0m; Uvão=1.60; g-value=0.26; r=0.43; a=0.8;	133.4	269.9	PE=0.04m; COB=0.10m; PAV=0m; Uvão=1.60; g-value=0.26; r=0.43; a=0.4;
			LED	142.6	328.6	PE=0.35m; COB=0.40m; PAV=0m; Uvão=1.60; g-value=0.26; r=0.43; a=0.8;	125.6	709.6	PE=0.04m; COB=0.10m; PAV=0m; Uvão=1.60; g-value=0.26; r=0.43; a=0.4;

Edifícios de escritórios de baixas necessidades de energia –
Contributo da arquitetura e soluções passivas para soluções de custo-ótimo

Tabela 5.5: Soluções de energia mínima na situação de ventilação híbrida nas duas localizações de estudo.

Soluções de energia mínima - Ventilação Híbrida									
RPH [h ⁻¹]	WWR [%]	GI	Tipo de iluminação	Helsinquia			Lisboa		
				IEE [kWh/m ² .ano]	Custo global [€/m ²]	Solução Envolvente	IEE [kWhEP/m ² .ano]	Custo global [€/m ²]	Solução Envolvente
2	10	Altos	CFL	186.0	617.8	PE=0.25m; COB=0.35m; PAV=0m; Uvão=1.60; g-value=0.26;τ=0.43; α=0.8;	188.5	576.5	PE=0.04m; COB=0.10m; PAV=0m; Uvão=1.60; g-value=0.26; τ=0.43; α=0.4;
			LED	168.9	958.2	PE=0.25m; COB=0.35m; PAV=0m; Uvão=1.60; g-value=0.26;τ=0.43; α=0.8;	169.1	916.6	PE=0.04m; COB=0.10m; PAV=0m; Uvão=1.60; g-value=0.26;τ=0.43; α=0.4;
		Baixos	CFL	131.6	618.7	PE=0.25m; COB=0.35m; PAV=0m; Uvão=1.60; g-value=0.26;τ=0.43; α=0.8;	123.2	575.7	PE=0.04m; COB=0.10m; PAV=0m; Uvão=1.60; g-value=0.26;τ=0.43; α=0.4;
			LED	116.1	959.4	PE=0.25m; COB=0.35m; PAV=0m; Uvão=1.60; g-value=0.26;τ=0.43; α=0.8;	104.3	915.8	PE=0.04m; COB=0.10m; PAV=0m; Uvão=1.60; g-value=0.26;τ=0.43; α=0.4;
	40	Altos	CFL	182.8	618.4	PE=0.25m; COB=0.35m; PAV=0m; Uvão=1.60; g-value=0.26;τ=0.43; α=0.8;	179.3	576.4	PE=0.04m; COB=0.10m; PAV=0m; Uvão=1.60; g-value=0.26;τ=0.43; α=0.4;
			LED	169.0	958.9	PE=0.25m; COB=0.35m; PAV=0m; Uvão=1.60; g-value=0.26;τ=0.43; α=0.8;	163.6	916.5	PE=0.04m; COB=0.10m; PAV=0m; Uvão=1.60; g-value=0.26;τ=0.43; α=0.4;
		Baixos	CFL	129.5	619.5	PE=0.25m; COB=0.35m; PAV=0m; Uvão=1.60; g-value=0.26;τ=0.43; α=0.8;	115.3	575.8	PE=0.04m; COB=0.10m; PAV=0m; Uvão=1.60; g-value=0.26;τ=0.43; α=0.4;
			LED	116.7	960.2	PE=0.25m; COB=0.35m; PAV=0m; Uvão=1.60; g-value=0.26;τ=0.43; α=0.8;	100.4	916.0	PE=0.04m; COB=0.10m; PAV=0m; Uvão=1.60; g-value=0.26;τ=0.43; α=0.4;
	80	Altos	CFL	184.7	620.2	PE=0.25m; COB=0.35m; PAV=0m; Uvão=1.60; g-value=0.26;τ=0.43; α=0.8;	171.5	577.1	PE=0.04m; COB=0.10m; PAV=0m; Uvão=1.60; g-value=0.26;τ=0.43; α=0.4;
			LED	174.7	960.7	PE=0.25m; COB=0.35m; PAV=0m; Uvão=1.60; g-value=0.26;τ=0.43; α=0.8;	161.4	917.2	PE=0.04m; COB=0.10m; PAV=0m; Uvão=1.60; g-value=0.26; τ=0.43; α=0.4;
		Baixos	CFL	131.9	621.3	PE=0.25m; COB=0.35m; PAV=0m; Uvão=1.60; g-value=0.26;τ=0.43; α=0.8;	105.9	576.2	PE=0.04m; COB=0.10m; PAV=0m; Uvão=1.60; g-value=0.26;τ=0.43; α=0.4;
			LED	122.5	962.0	PE=0.25m; COB=0.35m; PAV=0m; Uvão=1.60; g-value=0.26;τ=0.43; α=0.8;	96.0	916.4	PE=0.04m; COB=0.10m; PAV=0m; Uvão=1.60; g-value=0.26;τ=0.43; α=0.4;
5	10	Altos	CFL	185.3	623.7	PE=0.25m; COB=0.35m; PAV=0m; Uvão=1.60; g-value=0.26;τ=0.43; α=0.8;	187.0	582.3	PE=0.04m; COB=0.10m; PAV=0m; Uvão=1.60; g-value=0.26; τ=0.43; α=0.4;
			LED	167.3	952.0	PE=0.25m; COB=0.35m; PAV=0m; Uvão=1.60; g-value=0.26;τ=0.43; α=0.8;	167.7	922.4	PE=0.04m; COB=0.10m; PAV=0m; Uvão=1.60; g-value=0.26; τ=0.43; α=0.4;
		Baixos	CFL	131.4	624.7	PE=0.25m; COB=0.35m; PAV=0m; Uvão=1.60; g-value=0.26;τ=0.43; α=0.8;	122.3	581.6	PE=0.04m; COB=0.10m; PAV=0m; Uvão=1.60; g-value=0.26; τ=0.43; α=0.4;
			LED	115.9	965.4	PE=0.25m; COB=0.35m; PAV=0m; Uvão=1.60; g-value=0.26;τ=0.43; α=0.8;	103.6	921.8	PE=0.04m; COB=0.10m; PAV=0m; Uvão=1.60; g-value=0.26; τ=0.43; α=0.4;
	40	Altos	CFL	183.4	558.8	PE=0.35m; COB=0.40m; PAV=0m; Uvão=1.60; g-value=0.26;τ=0.43; α=0.8;	179.5	582.5	PE=0.04m; COB=0.10m; PAV=0m; Uvão=1.60; g-value=0.26; τ=0.43; α=0.4;
			LED	168.5	964.9	PE=0.35m; COB=0.40m; PAV=0m; Uvão=1.60; g-value=0.26;τ=0.43; α=0.8;	164.1	922.6	PE=0.04m; COB=0.10m; PAV=0m; Uvão=1.60; g-value=0.26; τ=0.43; α=0.4;
		Baixos	CFL	129.3	625.5	PE=0.25m; COB=0.35m; PAV=0m; Uvão=1.60; g-value=0.26;τ=0.43; α=0.8;	116.5	582.0	PE=0.04m; COB=0.10m; PAV=0m; Uvão=1.60; g-value=0.26; τ=0.43; α=0.4;
			LED	116.6	966.2	PE=0.25m; COB=0.35m; PAV=0m; Uvão=1.60; g-value=0.26;τ=0.43; α=0.8;	101.6	922.3	PE=0.04m; COB=0.10m; PAV=0m; Uvão=1.60; g-value=0.26; τ=0.43; α=0.4;
	80	Altos	CFL	184.2	626.1	PE=0.25m; COB=0.35m; PAV=0m; Uvão=1.60; g-value=0.26;τ=0.43; α=0.8;	169.9	582.7	PE=0.04m; COB=0.10m; PAV=0m; Uvão=1.60; g-value=0.26; τ=0.43; α=0.4;
			LED	174.3	966.7	PE=0.25m; COB=0.35m; PAV=0m; Uvão=1.60; g-value=0.26;τ=0.43; α=0.8;	158.9	922.9	PE=0.04m; COB=0.10m; PAV=0m; Uvão=1.60; g-value=0.26; τ=0.43; α=0.4;
		Baixos	CFL	131.7	627.4	PE=0.25m; COB=0.35m; PAV=0m; Uvão=1.60; g-value=0.26;τ=0.43; α=0.8;	105.0	582.0	PE=0.04m; COB=0.10m; PAV=0m; Uvão=1.60; g-value=0.26; τ=0.43; α=0.4;
			LED	122.3	968.0	PE=0.25m; COB=0.35m; PAV=0m; Uvão=1.60; g-value=0.26;τ=0.43; α=0.8;	94.3	922.2	PE=0.04m; COB=0.10m; PAV=0m; Uvão=1.60; g-value=0.26; τ=0.43; α=0.4;
10	10	Altos	CFL	185.1	633.8	PE=0.25m; COB=0.35m; PAV=0m; Uvão=1.60; g-value=0.26;τ=0.43; α=0.8;	186.2	592.3	PE=0.04m; COB=0.10m; PAV=0m; Uvão=1.60; g-value=0.26; τ=0.43; α=0.4;
			LED	168.2	974.2	PE=0.25m; COB=0.35m; PAV=0m; Uvão=1.60; g-value=0.26;τ=0.43; α=0.8;	167.1	932.4	PE=0.04m; COB=0.10m; PAV=0m; Uvão=1.60; g-value=0.26; τ=0.43; α=0.4;
		Baixos	CFL	130.1	638.7	PE=0.35m; COB=0.40m; PAV=0m; Uvão=1.60; g-value=0.26;τ=0.43; α=0.8;	122.0	591.6	PE=0.04m; COB=0.10m; PAV=0m; Uvão=1.60; g-value=0.26; τ=0.43; α=0.4;
			LED	115.9	975.5	PE=0.25m; COB=0.35m; PAV=0m; Uvão=1.60; g-value=0.26;τ=0.43; α=0.8;	103.3	931.8	PE=0.04m; COB=0.10m; PAV=0m; Uvão=1.60; g-value=0.26; τ=0.43; α=0.4;
	40	Altos	CFL	182.0	634.4	PE=0.25m; COB=0.35m; PAV=0m; Uvão=1.60; g-value=0.26;τ=0.43; α=0.8;	182.0	593.0	PE=0.04m; COB=0.10m; PAV=0m; Uvão=1.60; g-value=0.26; τ=0.43; α=0.4;
			LED	168.4	975.0	PE=0.25m; COB=0.35m; PAV=0m; Uvão=1.60; g-value=0.26;τ=0.43; α=0.8;	166.8	933.2	PE=0.04m; COB=0.10m; PAV=0m; Uvão=1.60; g-value=0.26; τ=0.43; α=0.4;
		Baixos	CFL	129.3	625.5	PE=0.25m; COB=0.35m; PAV=0m; Uvão=1.60; g-value=0.26;τ=0.43; α=0.8;	119.5	596.0	PE=0.04m; COB=0.10m; PAV=0m; Uvão=1.60; g-value=0.26; τ=0.43; α=0.4;
			LED	116.6	976.3	PE=0.25m; COB=0.35m; PAV=0m; Uvão=1.60; g-value=0.26;τ=0.43; α=0.8;	104.6	936.3	PE=0.04m; COB=0.10m; PAV=0m; Uvão=1.60; g-value=0.26; τ=0.43; α=0.4;
	80	Altos	CFL	170.1	904.2	PE=0.25m; COB=0.35m; PAV=0m; Uvão=1.60; g-value=0.26;τ=0.43; α=0.8;	169.0	592.7	PE=0.04m; COB=0.10m; PAV=0m; Uvão=1.60; g-value=0.26; τ=0.43; α=0.4;
			LED	174.3	966.7	PE=0.25m; COB=0.35m; PAV=0m; Uvão=1.60; g-value=0.26;τ=0.43; α=0.8;	158.8	933.0	PE=0.04m; COB=0.10m; PAV=0m; Uvão=1.60; g-value=0.26; τ=0.43; α=0.4;
		Baixos	CFL	131.7	627.4	PE=0.25m; COB=0.35m; PAV=0m; Uvão=1.60; g-value=0.26;τ=0.43; α=0.8;	104.5	592.0	PE=0.04m; COB=0.10m; PAV=0m; Uvão=1.60; g-value=0.26; τ=0.43; α=0.4;
			LED	122.2	978.1	PE=0.25m; COB=0.35m; PAV=0m; Uvão=1.60; g-value=0.26;τ=0.43; α=0.8;	93.8	932.2	PE=0.04m; COB=0.10m; PAV=0m; Uvão=1.60; g-value=0.26; τ=0.43; α=0.4;

Deste modo a análise foi efetuada de forma individualizada para parâmetros descritos em seguida, na qual a Tabela 5.6 resume as variações verificadas nas necessidades de energia primária das variáveis da SA local efetuada:

- **WWR**

A variação da fração de WWR traduz-se numa variação do valor de necessidades de energia, de $\pm 5\%$ a $\pm 8\%$ em ambas as localizações. A variação de dados apresentada indica que na localização de Helsínquia o incremento do valor de WWR além dos 10% conduz a um aumento das suas necessidades de energia. Na localização de Lisboa verifica-se a situação inversa.

A diferenciação verificada para o parâmetro WWR deve-se fundamentalmente às maiores necessidades de aquecimento de Helsínquia que necessita de uma minimização de perdas térmicas pela envolvente envidraçada, face a Lisboa que uma maior fração envidraçada proporciona um aproveitamento de iluminação natural e de ganhos solares que permitem uma diminuição das suas necessidades de iluminação artificial e de climatização para aquecimento dos espaços.

O valor de 10% para a cidade de Helsínquia, está de acordo com a sua legislação nacional [45], que preconiza um valor de WWR de referência de 15% e não aconselha valores superiores a 50%.

Em Lisboa, verifica-se que o valor que WWR de 80% conduz ao melhor desempenho energético. Contudo, dado que a variação entre os rácios de 40% e 80% não apresenta um efeito positivo além de 1% de redução nas necessidades de energia, o dimensionamento de vãos maiores que a dimensão de 40%, não se torna uma vantagem na ótica de otimização da dicotomia energia-custo. Estes rácios encontram-se próximos do valor de referência de 30% aplicável a todos os edifícios de comércio e serviços da legislação nacional [44].

- **Ganhos internos (ocupação e equipamentos elétricos)**

A variação de GI nos espaços, num fator de 1.5, permite avaliar a diferente resposta do edifício a uma situação de elevada e reduzida carga interna. No conjunto de soluções apresentadas verifica-se que um menor valor de GI permite uma redução nas necessidades de energia primária, em média, de 25% na localização de Helsínquia e de 35% na localização de Lisboa. Este resultado permite confirmar a importância que esta componente apresenta no desempenho energético das construções, e como é necessária à sua otimização de forma a atingir um maior número de edifícios de elevado desempenho energético. Contudo, em clima mais frios este fator pesa menos que em climas mais quentes, devido à maior necessidade de energia para aquecimento que os edifícios nestas condições climáticas detêm, sendo assim, beneficiadas por uma ocupação mais elevada que em zonas climáticas como as de Lisboa.

- **Tipo de iluminação aplicada**

Na Figura 5.14 e Figura 5.15 é notória, uma redução média de 10% das necessidades de energia com iluminação artificial do tipo LED face a CFL. Este facto deve-se à maior eficiência da fonte de luz LED, que permite assim otimizar os consumos energéticos desta componente do edifício. Dado o consumo energético da iluminação deter um elevado peso no desempenho energético dos edifícios de escritórios [99], torna-se uma variável que necessita de apresentar em todos os momentos uma elevada eficiência

energética em combinação com a aplicação de sistemas de controlo da iluminação natural, como é o caso do presente modelo.

Não obstante o impacto que o tipo de iluminação apresenta como medida de eficiência isolada, a sua influência encontra-se dependente do fator de WWR. Dos resultados verifica-se que ao aumentar o valor de WWR, o impacto do tipo de iluminação aplicada na redução das necessidades de energia diminui em média 3%. Este fato deve-se ao aproveitamento de iluminação natural realizado para maiores fatores de WWR, que diminui as necessidades de utilização de iluminação artificial. Assim sendo, o impacto positivo de aumentar a eficiência energética da iluminação artificial, aumenta com menores percentagens de WWR. Igualmente, é notório que numa situação de menores GI, o impacto da diferenciação do tipo de iluminação é menor, na ordem dos 3%.

No caso da localização de Helsínquia, o impacto de optar pela aplicação de iluminação CFL ou LED, é menor (em média, 5%) do que em Lisboa. Este facto deve-se às condições benéficas de localização de Lisboa, que apresentando uma menor latitude, beneficia de um maior período diurno com níveis de iluminação que permitam utilizar a disponibilidade de luz natural. Em oposição, a localização de Helsínquia, ao posicionar-se numa maior latitude apresenta a situação inversa.

Nas condições climáticas de Helsínquia, o impacto de utilização de iluminação LED face à utilização de iluminação CFL é de aproximadamente: 10% para WWR = 10%, e de 5% para WWR = 80%. No caso de Lisboa verifica-se que para WWR = 10% esta diferenciação apresenta um impacto de 15%, face a só 8% para WWR = 80%.

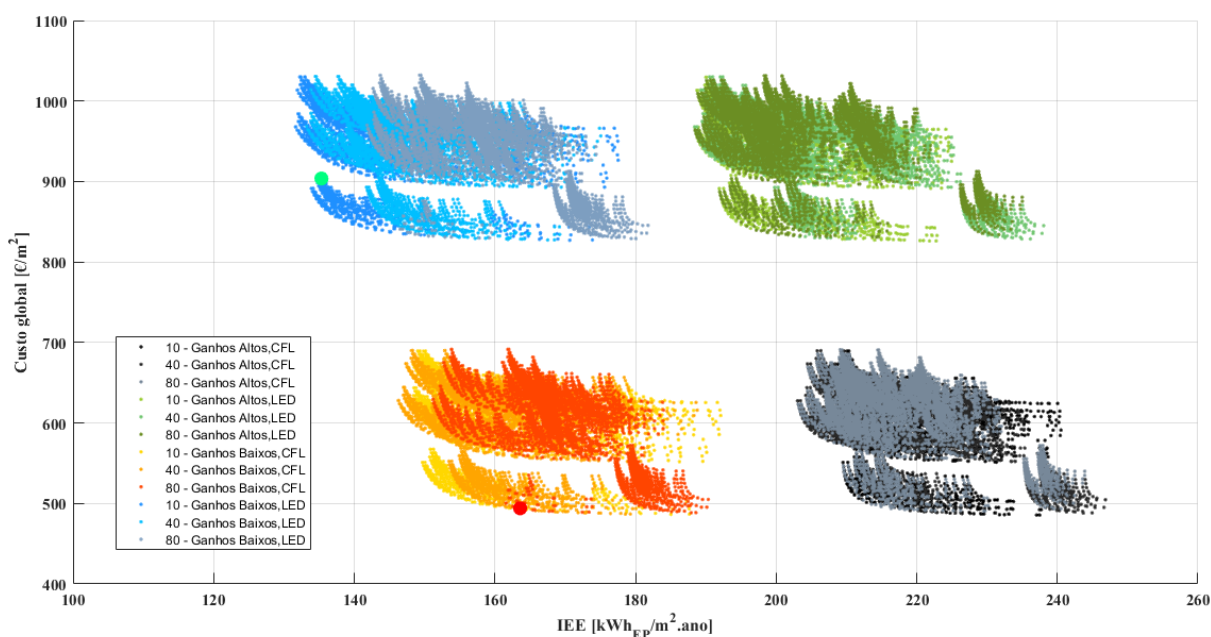


Figura 5.14: Soluções obtidas para as variáveis em estudo para a localização de Helsínquia na situação de ventilação mecânica. A verde a solução de energia mínima e a vermelho a solução de custo-ótimo.

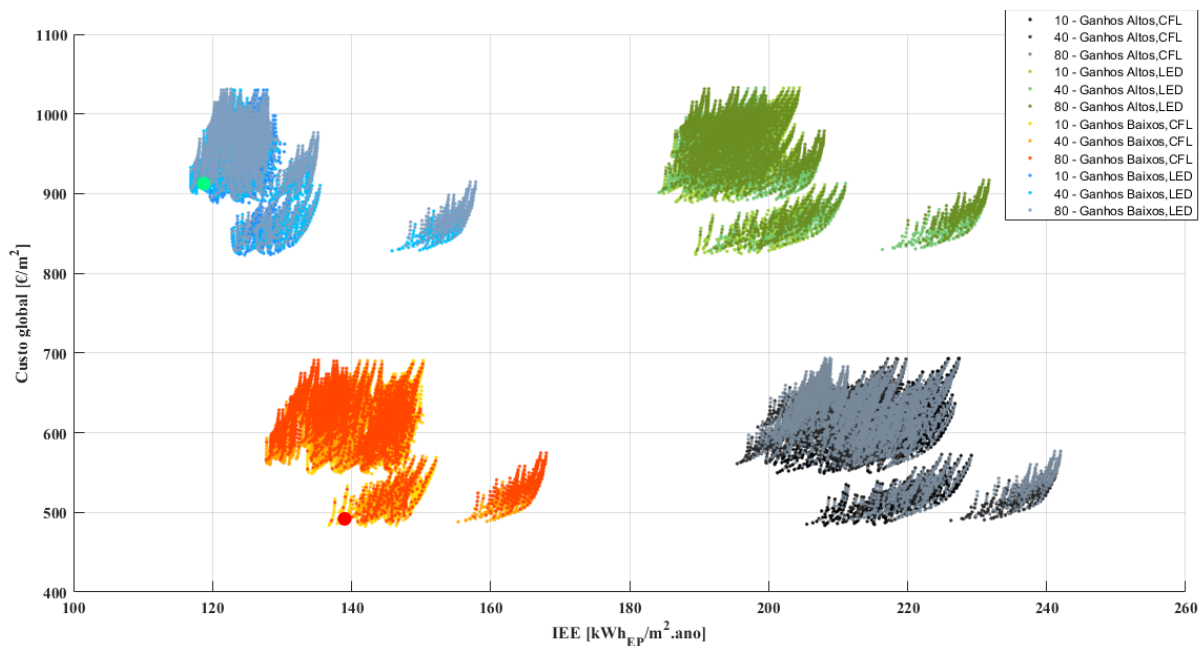


Figura 5.15: Soluções obtidas para as variáveis em estudo para a localização de Lisboa na situação de ventilação mecânica. A verde a solução de energia mínima e a vermelho a solução de custo-ótimo.

- **Tipo de sombreamento aplicado**

A variação do tipo de sombreamento aplicado traduz-se numa variação das necessidades de energia primária bastante reduzida nas duas localizações de estudo, como verificado na Figura 5.16. Nas soluções apresentadas para a localização de Helsínquia e Lisboa, a variação não atinge os 1% de diferença. O que numa situação de otimização da dicotomia energia-custo, justifica a recorrência a SI em ambas as localizações de estudo na gama de vãos envidraçados estudada. Este facto relaciona-se com a necessidade de utilização destes dispositivos tanto para controlo de ganhos solares nos vãos envidraçados, como de luz natural nos espaços de trabalho de modo a que os níveis de iluminação se encontrem adequados ao desenvolvimento das atividades dos ocupantes.

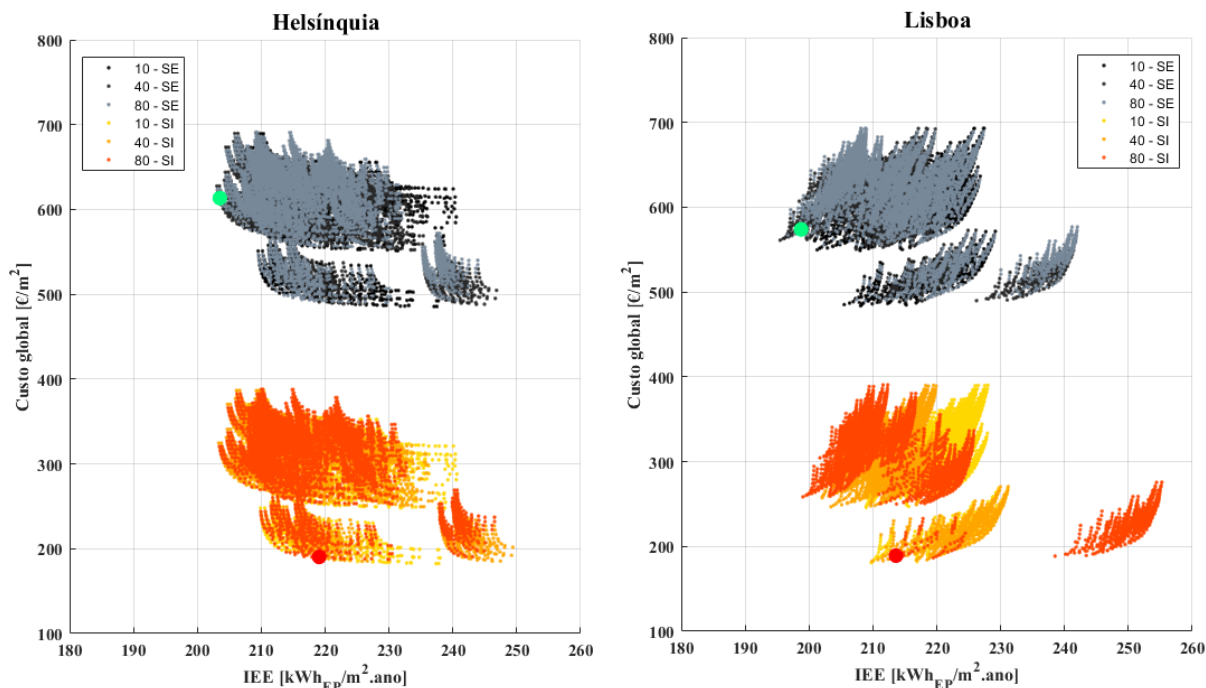


Figura 5.16: Influência da aplicação de SE ou SI, nas localizações de Helsínquia (à esquerda) e Lisboa (à direita). O conjunto das soluções apresentadas corresponde a uma situação de GI altos, iluminação CFL e VM. A verde a solução de energia mínima e a vermelho a solução de custo-ótimo.

- **Tipo de envolvente opaca e envidraçada aplicada**

Por último, a solução construtiva aplicada, ou seja, a influência que um maior ou menor valor de U_{global} apresenta no desempenho energético da construção é apresentada na Figura 5.17, para o caso da totalidade de superfícies que compõem a envolvente opaca, e na Figura 5.18 no caso dos vãos envidraçados.

Na Figura 5.17 é possível verificar que a influência do valor de U_{global} é mais elevada na localização de Helsínquia do que na de Lisboa, representando um impacto de 23% e 6% respetivamente nas necessidades de energia primária. Este resultado permite inferir que a qualidade térmica da envolvente opaca é mais determinante em condições climáticas mais frias do que mais quentes, sendo necessário uma maior exigência nesta componente quando expostas a condições mais adversas.

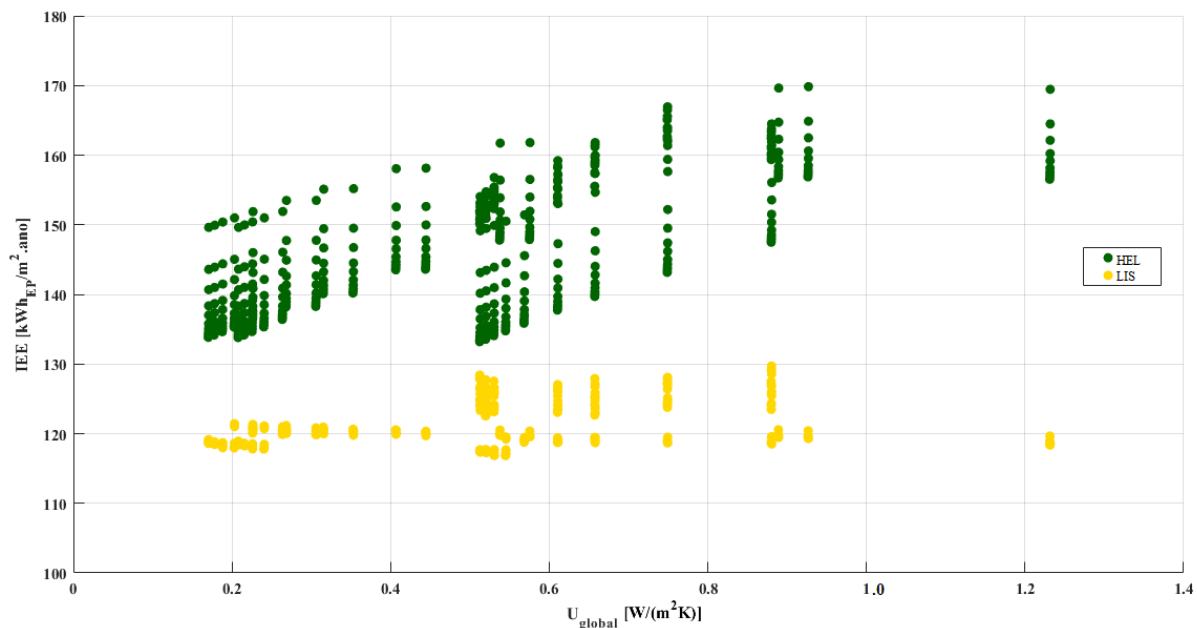


Figura 5.17: Variação do valor de U_{global} da envolvente opaca com as necessidades de energia primária. A presente situação corresponde à aplicação no modelo de simulação para as duas localizações das condições de VM, SE, GI baixos, iluminação LED e WWR = 40%.

Nas soluções de energia mínima apresentadas na Tabela 5.4 verifica-se uma repetição do mesmo tipo de envolvente opaca, com o facto de para a localização de Helsínquia o U_{global} desta varia entre 0.08 $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ e 0.14 $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$, dependendo esta variação do valor de WWR aplicado. Na localização de Lisboa verifica-se uma variação do valor de U da envolvente opaca entre 0.43 $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ e 0.58 $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$. Esta diferença obtida deve-se à maior exigência construtiva que os edifícios apresentam em condições climáticas mais adversas, como em Helsínquia.

A localização de Helsínquia necessita em toda a instância de uma minimização da fração de WWR, e uma solução construtiva adequada, com o menor valor de U de cada superfície possível numa ótica de maximização do desempenho energético da construção. Na localização de Lisboa, é necessária uma envolvente opaca com menor isolamento, o que conduz a um maior valor de U_{global} , que permite assim, um balanço entre ganhos e perdas de calor adequado às condições climáticas existentes.

No que diz respeito respeita a influência que a aplicação de diversos tipos de vãos envidraçados detém nas necessidades de energia primária da construção, é possível verificar na Figura 5.17 que a variação do valor de $U_{\text{vão}}$ (traduzido pelo valor de g , que permite a diferenciação entre os diferentes tipos de vão aplicados) segue a tendência que a variação de WWR impõem, ou seja, quanto mais adequada for a percentagem de WWR em combinação com o tipo de vão indicado, maior será o efeito positivo nas necessidades de energia primária da construção. Em termos de impacto nas necessidades de energia primária, para a localização de Helsínquia representa uma variação de 12% e para Lisboa de 10%.

Em adição, para um vão com o mesmo valor de $U_{\text{vão}}$, o fator solar deste influenciará o seu desempenho energético. Sendo que as soluções ditas de energia mínima não correspondem a uma solução com o menor valor de fator solar. Este facto deve-se à necessidade de as reduzidas necessidades de energia dependerem de um controlo de perdas pela envolvente envidraçada. Esta situação é conseguida por um

baixo valor de U, mas com um valor mais elevado de g e de transmitância, de modo a permitir que haja ganhos solares que supram tanto necessidades de energia para aquecimento como de iluminação natural.

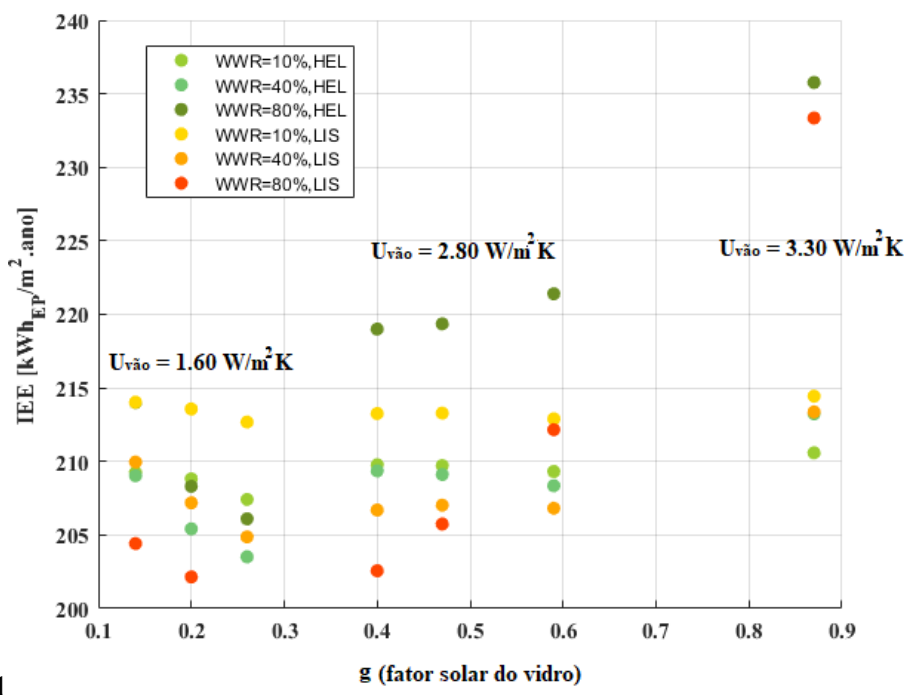


Figura 5.18: Influência do tipo de vão envidraçado aplicado nas localizações de Helsínquia e Lisboa. Esta situação corresponde à aplicação no modelo de simulação das condições de VM, SE, GI altos e iluminação CFL.

- **Absortância das superfícies exteriores**

No que respeita à possível influência que as cores das superfícies exteriores podem ter no desempenho energético da construção, verifica-se pela Figura 5.19 que evidencia duas soluções obtidas para um valor de $\alpha_{sup} = 0.4$ (cor clara) e $\alpha_{sup} = 0.8$ (cor escura), que esta variável detém uma baixa influência, representando somente 2% de impacto nas necessidades de energia primária do modelo em estudo na localização de Lisboa e 0% em Helsínquia.

Não obstante do acima referido, torna-se mais favorável para o desempenho energético da construção, que em localizações com o clima de Helsínquia se opte por cores mais escuras, e em localizações com as condições climáticas de Lisboa, por cores mais claras. Esta questão prende-se fundamentalmente com a transferência de calor pela envolvente opaca, sendo que cores mais escuras absorvem mais ganhos solares e cores mais claras, em oposição, refletem mais estes mesmos ganhos. No presente caso de estudo, a escolha de cores escuras poderá ser uma vantagem em Helsínquia, uma vez que o aumento dos ganhos solares permite suprir as maiores necessidades de aquecimento, enquanto em Lisboa a escolha de cores claras ajuda a colmatar as necessidades de arrefecimento ou a diminuir os ganhos solares por estas superfícies.

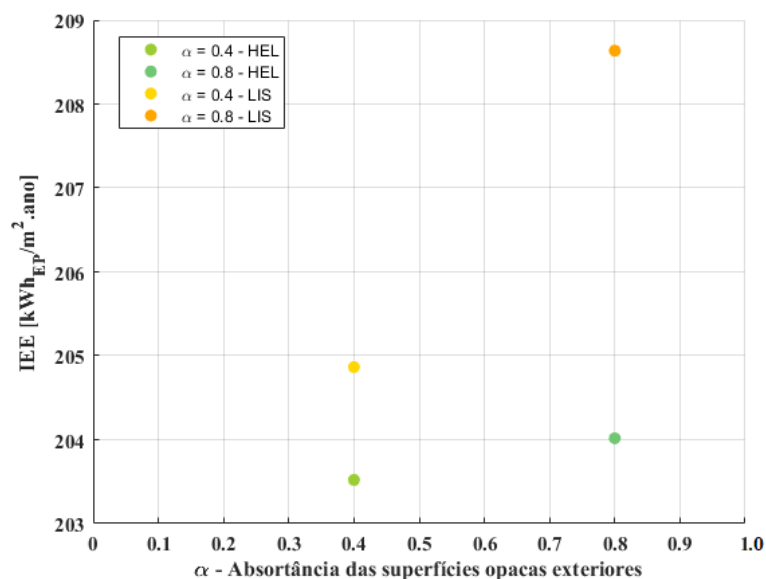


Figura 5.19: Influência da absorvância das superfícies exteriores – parede exterior e cobertura – nas localizações de Helsínquia e Lisboa. Esta situação corresponde à aplicação no modelo de simulação das condições de VM, SE, GI altos, iluminação CFL e WWR = 40 %.

Tabela 5.6: Síntese do impacto das variáveis acima analisadas nas necessidades de energia primária do modelo em estudo.

Variáveis	Helsínquia	Lisboa
	Impacto nas necessidades de energia primária [%]	
WWR	±5 a ±8	±5 a ±8
GI	±25	±35
Iluminação	±10	±10
Sombreamento	±1	±1
U _{global}	±23	±6
U _{vão}	±12	±10
α _{sup}	0	±2

No que respeita às soluções de energia mínima obtidas na situação de VH, ou seja, quando VN é aplicada, na Tabela 5.5 verifica-se em todas as soluções consideradas uma diminuição das necessidades de energia primária, em média, de 10% nas duas localizações. Este resultado permite verificar como a aplicação estratégica de uma solução de ventilação híbrida poderá ser benéfica no desempenho energético dos edifícios de escritórios, dado o peso da componente de ventilação no consumo energético desta tipologia de edificações. Analogamente, esta redução não provoca qualquer alteração nas soluções de energia mínima obtidas, corroborando o impacto positivo que a adição desta estratégia de eficiência energética apresenta na redução das necessidades de energia da construção.

Relativamente à variação do número de RPH impostas na ventilação, é notório na Figura 5.20 que, em qualquer das localizações, um aumento em 5 ou 10 RPH não é vantajoso do ponto de vista energético. Igualmente numa ótica de otimização do custo global da solução, um incremento do número de renovações exige um aumento nos custos dos equipamentos de ventilação, o que não contribuindo num retorno energético não se torna vantajoso. Assim sendo, é suficiente nesta tipologia de edifícios, quando

as condições ambientes exteriores o permite, a aplicação de VN com uma taxa de 2 RPH, em combinação com o funcionamento de VM.

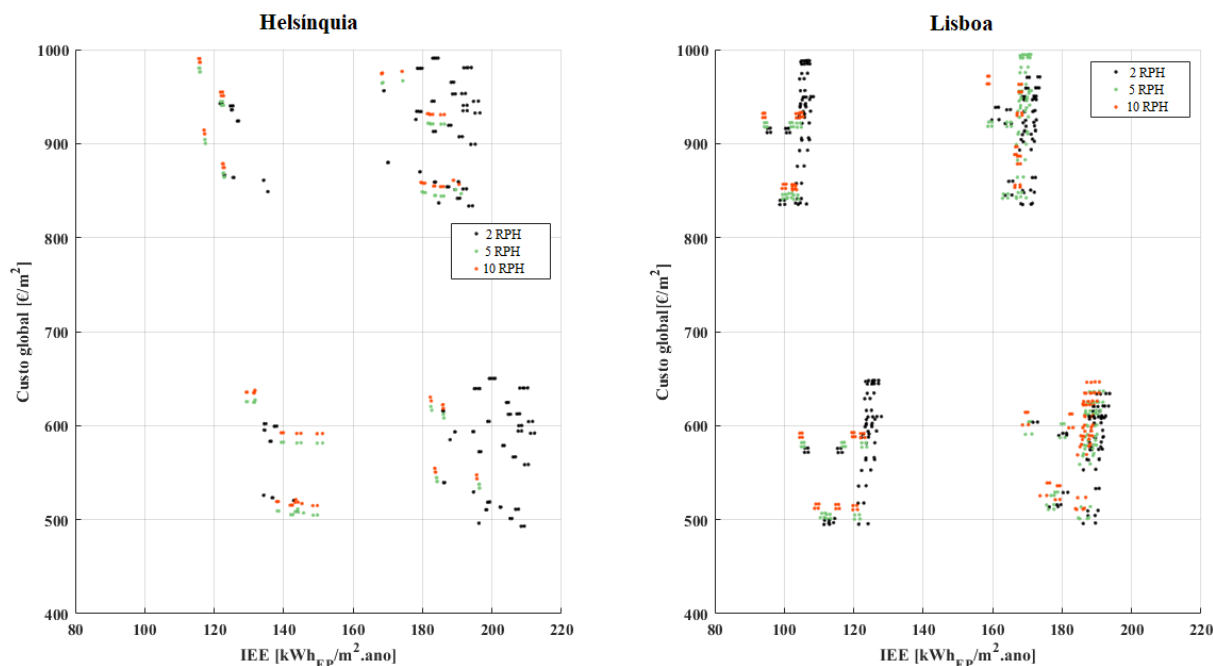


Figura 5.20: Influência da variação de RPH na situação de VH e SE para as soluções de energia mínima e custo-ótimo nas duas localizações em estudo.

Particularizando a análise na ótica do fracionamento do consumo de energia elétrica nos diferentes usos do edifício para as melhores soluções obtidas a nível de energia mínima e custo-ótimo, verifica-se pela Figura 5.21 que as soluções construtivas aplicadas são suficientes na localização de Lisboa para minimizar as necessidades de climatização dos espaços, face a Helsinquia que detém em ambas as soluções um consumo elétrico desta componente significativo, uma vez que cumprem os valores mínimos regulamentares referidos na secção 3.2.4.1.

Na amostra da Figura 5.21, é ainda evidente a influência que as características dos vãos envidraçados detêm, pela diferença existente no consumo de iluminação entre a solução de energia mínima e de custo-ótimo, que corresponde à melhor e pior solução de vão envidraçado aplicado.

É igualmente verificável o elevado peso dos equipamentos elétricos no consumo energético da construção, face a qualquer uma das restantes componentes. Este facto permite afirmar a necessidade fulcral de otimizar ou diminuir o dispêndio energético desta fonte nos edifícios de escritórios, de modo a que o elevado desempenho energético possa ser alcançado.

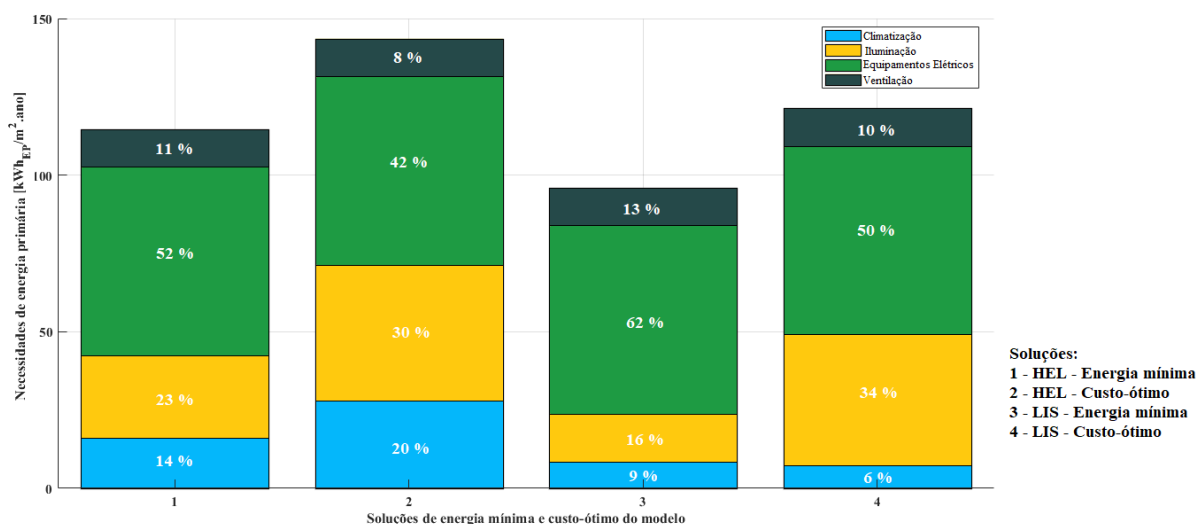


Figura 5.21: Comparação das necessidades de energia primária nas diferentes componentes de uso do edifício para a melhor solução a nível de energia mínima (Tabela 5.5) e custo-ótimo (Tabela 5.9) nas duas localizações em estudo.

1 – Solução de VH (2RPH), SE, GI baixos, iluminação LED e WWR = 10%; 2 – Solução de VH (2RPH), SE, GI baixos, iluminação CFL e WWR = 10%; 3 – Solução de VH (2RPH), SE, GI baixos, iluminação LED e WWR = 80%; 4 - Solução de VH (2RPH), SE, GI baixos, iluminação CFL e WWR = 10%.

Assim sendo, é possível resumir na Tabela 5.7 as soluções de energia mínima da totalidade de soluções apresentadas na Tabela 5.4 e Tabela 5.5, para as duas localizações e nas situações de GI altos e GI baixos, que refletem assim dois modos de operação do modelo de edifício em estudo:

Tabela 5.7: Síntese das melhores soluções de energia mínima obtidas na análise deste modelo. As soluções apresentadas correspondem a uma situação de VH com 2 RPH.

Soluções de energia mínima										
			Helsinquia				Lisboa			
GI	Tipo de iluminação	Tipo de sombreamento	WWR [%]	IEE [kWhEP/m².ano]	Custo global [€/m²]	Solução Envolvente	WWR [%]	IEE [kWhEP/m².ano]	Custo global [€/m²]	Solução Envolvente
Alto	CFL	SE	40	182.8	618.4	PE=0.25m; COB=0.35m; PAV=0m; Uvão=1.60; g-value=0.26;τ=0.43; α=0.8;	80	171.5	577.1	PE=0.04m; COB=0.10m; PAV=0m; Uvão=1.60; g-value=0.26;τ=0.43; α=0.4;
	LED		10	168.9	958.2	PE=0.25m; COB=0.35m; PAV=0m; Uvão=1.60; g-value=0.26;τ=0.43; α=0.8;	80	161.4	917.2	PE=0.04m; COB=0.10m; PAV=0m; Uvão=1.60; g-value=0.26;τ=0.43; α=0.4;
Baixo	CFL		40	129.5	619.5	PE=0.25m; COB=0.35m; PAV=0m; Uvão=1.60; g-value=0.26;τ=0.43; α=0.8;	80	105.9	576.2	PE=0.04m; COB=0.10m; PAV=0m; Uvão=1.60; g-value=0.26;τ=0.43; α=0.4;
	LED		10	116.1	959.4	PE=0.25m; COB=0.35m; PAV=0m; Uvão=1.60; g-value=0.26;τ=0.43; α=0.8;	80	96.0	916.4	PE=0.04m; COB=0.10m; PAV=0m; Uvão=1.60; g-value=0.26;τ=0.43; α=0.4;

5.4.3. Soluções de custo-ótimo

No que respeita às soluções de custo-ótimo obtidas, resumidas na Tabela 5.8 e Tabela 5.9 para as situações de simulação de VM e VH, respetivamente, verifica-se em todos os casos apresentados uma diminuição do custo global e um aumento do valor de necessidades de energia primária, por comparação, com as soluções de energia mínima apresentadas na secção anterior.

Edifícios de escritórios de baixas necessidades de energia –
Contributo da arquitetura e soluções passivas para soluções de custo-ótimo

Tabela 5.8: Soluções de custo-ótimo na situação de ventilação mecânica nas duas localizações em estudo.

Soluções de custo ótimo - Ventilação Mecânica									
Tipo de sombreamento	WWR [%]	GI	Tipo de iluminação	Helsinquia			Lisboa		
				IEE [kWh/m².ano]	Custo global [€/m²]	Solução Envolvente	IEE [kWhEP/m².ano]	Custo global [€/m²]	Solução Envolvente
SE	10	Altos	CFL	217.9	495.8	PE=0.04m; COB=0.10m; PAV=0m; Uvão=3.30; g-value=0.87; τ=0.81; α=0.8;	213.9	494.4	PE=0.04m; COB=0.07m; PAV=0m; Uvão=3.30; g-value=0.87; τ=0.81; α=0.4;
			LED	201.7	836.2	PE=0.04m; COB=0.10m; PAV=0m; Uvão=3.30; g-value=0.87; τ=0.81; α=0.8;	193.8	834.2	PE=0.04m; COB=0.07m; PAV=0m; Uvão=3.30; g-value=0.87; τ=0.81; α=0.4;
		Baixos	CFL	163.6	494.0	PE=0.04m; COB=0.10m; PAV=0m; Uvão=3.30; g-value=0.87; τ=0.81; α=0.8;	142.0	492.6	PE=0.04m; COB=0.07m; PAV=0m; Uvão=3.30; g-value=0.87; τ=0.81; α=0.4;
			LED	147.6	836.8	PE=0.04m; COB=0.10m; PAV=0m; Uvão=3.30; g-value=0.87; τ=0.81; α=0.8;	123.4	832.6	PE=0.04m; COB=0.07m; PAV=0m; Uvão=3.30; g-value=0.87; τ=0.81; α=0.4;
	40	Altos	CFL	218.0	494.4	PE=0.04m; COB=0.10m; PAV=0m; Uvão=3.30; g-value=0.87; τ=0.81; α=0.8;	212.8	496.1	PE=0.04m; COB=0.07m; PAV=0m; Uvão=3.30; g-value=0.87; τ=0.81; α=0.4;
			LED	206.5	837.3	PE=0.04m; COB=0.10m; PAV=0m; Uvão=3.30; g-value=0.87; τ=0.81; α=0.8;	196.6	833.7	PE=0.04m; COB=0.07m; PAV=0m; Uvão=3.30; g-value=0.87; τ=0.81; α=0.4;
		Baixos	CFL	161.4	497.3	PE=0.04m; COB=0.10m; PAV=0m; Uvão=3.30; g-value=0.87; τ=0.81; α=0.8;	140.1	494.1	PE=0.04m; COB=0.07m; PAV=0m; Uvão=3.30; g-value=0.87; τ=0.81; α=0.4;
			LED	150.2	837.8	PE=0.04m; COB=0.10m; PAV=0m; Uvão=3.30; g-value=0.87; τ=0.81; α=0.8;	126.4	834.2	PE=0.04m; COB=0.07m; PAV=0m; Uvão=3.30; g-value=0.87; τ=0.81; α=0.4;
	80	Altos	CFL	238.1	499.8	PE=0.04m; COB=0.10m; PAV=0m; Uvão=3.30; g-value=0.87; τ=0.81; α=0.8;	232.7	500.6	PE=0.04m; COB=0.07m; PAV=0m; Uvão=3.30; g-value=0.87; τ=0.81; α=0.4;
			LED	229.2	840.2	PE=0.04m; COB=0.10m; PAV=0m; Uvão=3.30; g-value=0.87; τ=0.81; α=0.8;	221.8	838.5	PE=0.04m; COB=0.07m; PAV=0m; Uvão=3.30; g-value=0.87; τ=0.81; α=0.4;
		Baixos	CFL	180.6	500.0	PE=0.04m; COB=0.10m; PAV=0m; Uvão=3.30; g-value=0.87; τ=0.81; α=0.8;	160.1	498.7	PE=0.04m; COB=0.07m; PAV=0m; Uvão=3.30; g-value=0.87; τ=0.81; α=0.4;
			LED	171.3	840.4	PE=0.04m; COB=0.10m; PAV=0m; Uvão=3.30; g-value=0.87; τ=0.81; α=0.8;	150.3	838.8	PE=0.04m; COB=0.07m; PAV=0m; Uvão=3.30; g-value=0.87; τ=0.81; α=0.4;
SI	10	Altos	CFL	217.1	276.9	PE=0.04m; COB=0.10m; PAV=0m; Uvão=3.30; g-value=0.87; τ=0.81; α=0.8;	215.7	191.6	PE=0.04m; COB=0.07m; PAV=0m; Uvão=3.30; g-value=0.87; τ=0.81; α=0.4;
			LED	202.1	534.7	PE=0.04m; COB=0.10m; PAV=0m; Uvão=3.30; g-value=0.87; τ=0.81; α=0.8;	195.6	531.3	PE=0.04m; COB=0.07m; PAV=0m; Uvão=3.30; g-value=0.87; τ=0.81; α=0.4;
		Baixos	CFL	162.9	195.0	PE=0.04m; COB=0.07m; PAV=0m; Uvão=3.30; g-value=0.87; τ=0.81; α=0.8;	143.8	190.3	PE=0.04m; COB=0.07m; PAV=0m; Uvão=3.30; g-value=0.87; τ=0.81; α=0.4;
			LED	147.9	195.3	PE=0.04m; COB=0.10m; PAV=0m; Uvão=3.30; g-value=0.87; τ=0.81; α=0.8;	128.4	530.2	PE=0.04m; COB=0.07m; PAV=0m; Uvão=3.30; g-value=0.87; τ=0.81; α=0.4;
	40	Altos	CFL	217.9	196.0	PE=0.04m; COB=0.10m; PAV=0m; Uvão=3.30; g-value=0.87; τ=0.81; α=0.8;	217.5	193.7	PE=0.04m; COB=0.07m; PAV=0m; Uvão=3.30; g-value=0.87; τ=0.81; α=0.4;
			LED	207.6	536.5	PE=0.04m; COB=0.10m; PAV=0m; Uvão=3.30; g-value=0.87; τ=0.81; α=0.8;	203.0	533.6	PE=0.04m; COB=0.07m; PAV=0m; Uvão=3.30; g-value=0.87; τ=0.81; α=0.4;
		Baixos	CFL	153.1	225.0	PE=0.04m; COB=0.10m; PAV=0m; Uvão=3.30; g-value=0.87; τ=0.81; α=0.8;	149.0	198.1	PE=0.04m; COB=0.07m; PAV=0m; Uvão=3.30; g-value=0.87; τ=0.81; α=0.4;
			LED	137.5	225.2	PE=0.04m; COB=0.10m; PAV=0m; Uvão=3.30; g-value=0.87; τ=0.81; α=0.8;	133.3	531.7	PE=0.04m; COB=0.07m; PAV=0m; Uvão=3.30; g-value=0.87; τ=0.81; α=0.4;
	80	Altos	CFL	240.7	200.6	PE=0.04m; COB=0.10m; PAV=0m; Uvão=3.30; g-value=0.87; τ=0.81; α=0.8;	245.5	199.5	PE=0.04m; COB=0.07m; PAV=0m; Uvão=3.30; g-value=0.87; τ=0.81; α=0.4;
			LED	231.7	541.1	PE=0.04m; COB=0.10m; PAV=0m; Uvão=3.30; g-value=0.87; τ=0.81; α=0.8;	235.3	539.5	PE=0.04m; COB=0.07m; PAV=0m; Uvão=3.30; g-value=0.87; τ=0.81; α=0.4;
		Baixos	CFL	159.5	222.1	PE=0.04m; COB=0.10m; PAV=0m; Uvão=3.30; g-value=0.87; τ=0.81; α=0.8;	173.7	203.8	PE=0.04m; COB=0.07m; PAV=0m; Uvão=3.30; g-value=0.87; τ=0.81; α=0.4;
			LED	147.8	222.3	PE=0.04m; COB=0.10m; PAV=0m; Uvão=3.30; g-value=0.87; τ=0.81; α=0.8;	162.7	537.6	PE=0.04m; COB=0.07m; PAV=0m; Uvão=3.30; g-value=0.87; τ=0.81; α=0.4;

Edifícios de escritórios de baixas necessidades de energia –
Contributo da arquitetura e soluções passivas para soluções de custo-ótimo

Tabela 5.9: Soluções de custo-ótimo na situação de ventilação híbrida nas duas localizações em estudo.

Soluções de custo ótimo - Ventilação Híbrida									
RPH [h ⁻¹]	WWR [%]	GI	Tipo de iluminação	Helsinquia			Lisboa		
				IEE [kWh/m ² .ano]	Custo global [€/m ²]	Solução Envolvente	IEE [kWh/m ² .ano]	Custo global [€/m ²]	Solução Envolvente
2	10	Altos	CFL	196.2	501.2	PE=0.04m; COB=0.10m; PAV=0m; Uvão=3.30; g-value=0.87; τ=0.81; α=0.8;	187.1	497.6	PE=0.04m; COB=0.07m; PAV=0m; Uvão=3.30; g-value=0.87; τ=0.81; α=0.4;
			LED	180.8	841.8	PE=0.04m; COB=0.10m; PAV=0m; Uvão=3.30; g-value=0.87; τ=0.81; α=0.8;	168.8	837.6	PE=0.04m; COB=0.07m; PAV=0m; Uvão=3.30; g-value=0.87; τ=0.81; α=0.4;
		Baixos	CFL	143.6	502.4	PE=0.04m; COB=0.10m; PAV=0m; Uvão=3.30; g-value=0.87; τ=0.81; α=0.8;	121.4	496.7	PE=0.04m; COB=0.07m; PAV=0m; Uvão=3.30; g-value=0.87; τ=0.81; α=0.4;
			LED	128.9	843.1	PE=0.04m; COB=0.10m; PAV=0m; Uvão=3.30; g-value=0.87; τ=0.81; α=0.8;	103.7	836.8	PE=0.04m; COB=0.07m; PAV=0m; Uvão=3.30; g-value=0.87; τ=0.81; α=0.4;
	40	Altos	CFL	192.3	502.2	PE=0.04m; COB=0.10m; PAV=0m; Uvão=3.30; g-value=0.87; τ=0.81; α=0.8;	176.7	497.8	PE=0.04m; COB=0.07m; PAV=0m; Uvão=3.30; g-value=0.87; τ=0.81; α=0.4;
			LED	180.6	842.7	PE=0.04m; COB=0.10m; PAV=0m; Uvão=3.30; g-value=0.87; τ=0.81; α=0.8;	163.4	837.9	PE=0.04m; COB=0.07m; PAV=0m; Uvão=3.30; g-value=0.87; τ=0.81; α=0.4;
		Baixos	CFL	138.7	503.2	PE=0.04m; COB=0.10m; PAV=0m; Uvão=3.30; g-value=0.87; τ=0.81; α=0.8;	111.6	497.0	PE=0.04m; COB=0.07m; PAV=0m; Uvão=3.30; g-value=0.87; τ=0.81; α=0.4;
			LED	127.4	843.8	PE=0.04m; COB=0.10m; PAV=0m; Uvão=3.30; g-value=0.87; τ=0.81; α=0.8;	98.8	837.2	PE=0.04m; COB=0.07m; PAV=0m; Uvão=3.30; g-value=0.87; τ=0.81; α=0.4;
	80	Altos	CFL	199.5	504.6	PE=0.04m; COB=0.10m; PAV=0m; Uvão=3.30; g-value=0.87; τ=0.81; α=0.8;	179.7	499.6	PE=0.04m; COB=0.07m; PAV=0m; Uvão=3.30; g-value=0.87; τ=0.81; α=0.4;
			LED	190.6	845.1	PE=0.04m; COB=0.10m; PAV=0m; Uvão=3.30; g-value=0.87; τ=0.81; α=0.8;	170.1	839.8	PE=0.04m; COB=0.07m; PAV=0m; Uvão=3.30; g-value=0.87; τ=0.81; α=0.4;
		Baixos	CFL	145.0	505.5	PE=0.04m; COB=0.10m; PAV=0m; Uvão=3.30; g-value=0.87; τ=0.81; α=0.8;	113.2	498.6	PE=0.04m; COB=0.07m; PAV=0m; Uvão=3.30; g-value=0.87; τ=0.81; α=0.4;
			LED	136.3	846.0	PE=0.04m; COB=0.10m; PAV=0m; Uvão=3.30; g-value=0.87; τ=0.81; α=0.8;	103.6	838.8	PE=0.04m; COB=0.07m; PAV=0m; Uvão=3.30; g-value=0.87; τ=0.81; α=0.4;
5	10	Altos	CFL	195.6	507.2	PE=0.04m; COB=0.10m; PAV=0m; Uvão=3.30; g-value=0.87; τ=0.81; α=0.8;	185.3	503.3	PE=0.04m; COB=0.07m; PAV=0m; Uvão=3.30; g-value=0.87; τ=0.81; α=0.4;
			LED	180.3	847.8	PE=0.04m; COB=0.10m; PAV=0m; Uvão=3.30; g-value=0.87; τ=0.81; α=0.8;	167.2	843.4	PE=0.04m; COB=0.07m; PAV=0m; Uvão=3.30; g-value=0.87; τ=0.81; α=0.4;
		Baixos	CFL	143.3	508.4	PE=0.04m; COB=0.10m; PAV=0m; Uvão=3.30; g-value=0.87; τ=0.81; α=0.8;	120.3	502.6	PE=0.04m; COB=0.07m; PAV=0m; Uvão=3.30; g-value=0.87; τ=0.81; α=0.4;
			LED	128.7	849.1	PE=0.04m; COB=0.10m; PAV=0m; Uvão=3.30; g-value=0.87; τ=0.81; α=0.8;	102.8	842.7	PE=0.04m; COB=0.07m; PAV=0m; Uvão=3.30; g-value=0.87; τ=0.81; α=0.4;
	40	Altos	CFL	191.5	508.1	PE=0.04m; COB=0.10m; PAV=0m; Uvão=3.30; g-value=0.87; τ=0.81; α=0.8;	176.0	503.7	PE=0.04m; COB=0.07m; PAV=0m; Uvão=3.30; g-value=0.87; τ=0.81; α=0.4;
			LED	179.9	848.7	PE=0.04m; COB=0.10m; PAV=0m; Uvão=3.30; g-value=0.87; τ=0.81; α=0.8;	165.8	843.9	PE=0.04m; COB=0.07m; PAV=0m; Uvão=3.30; g-value=0.87; τ=0.81; α=0.4;
		Baixos	CFL	138.2	509.2	PE=0.04m; COB=0.10m; PAV=0m; Uvão=3.30; g-value=0.87; τ=0.81; α=0.8;	112.2	503.1	PE=0.04m; COB=0.07m; PAV=0m; Uvão=3.30; g-value=0.87; τ=0.81; α=0.4;
			LED	127.0	849.8	PE=0.04m; COB=0.10m; PAV=0m; Uvão=3.30; g-value=0.87; τ=0.81; α=0.8;	99.6	843.3	PE=0.04m; COB=0.07m; PAV=0m; Uvão=3.30; g-value=0.87; τ=0.81; α=0.4;
	80	Altos	CFL	198.5	510.5	PE=0.04m; COB=0.10m; PAV=0m; Uvão=3.30; g-value=0.87; τ=0.81; α=0.8;	176.7	505.2	PE=0.04m; COB=0.07m; PAV=0m; Uvão=3.30; g-value=0.87; τ=0.81; α=0.4;
			LED	189.6	851.0	PE=0.04m; COB=0.10m; PAV=0m; Uvão=3.30; g-value=0.87; τ=0.81; α=0.8;	167.1	845.4	PE=0.04m; COB=0.07m; PAV=0m; Uvão=3.30; g-value=0.87; τ=0.81; α=0.4;
		Baixos	CFL	144.1	511.4	PE=0.04m; COB=0.10m; PAV=0m; Uvão=3.30; g-value=0.87; τ=0.81; α=0.8;	110.7	504.3	PE=0.04m; COB=0.07m; PAV=0m; Uvão=3.30; g-value=0.87; τ=0.81; α=0.4;
			LED	135.4	851.9	PE=0.04m; COB=0.10m; PAV=0m; Uvão=3.30; g-value=0.87; τ=0.81; α=0.8;	101.2	844.4	PE=0.04m; COB=0.07m; PAV=0m; Uvão=3.30; g-value=0.87; τ=0.81; α=0.4;
10	10	Altos	CFL	195.4	517.2	PE=0.04m; COB=0.10m; PAV=0m; Uvão=3.30; g-value=0.87; τ=0.81; α=0.8;	184.3	513.3	PE=0.04m; COB=0.07m; PAV=0m; Uvão=3.30; g-value=0.87; τ=0.81; α=0.4;
			LED	180.2	857.9	PE=0.04m; COB=0.10m; PAV=0m; Uvão=3.30; g-value=0.87; τ=0.81; α=0.8;	166.4	853.4	PE=0.04m; COB=0.07m; PAV=0m; Uvão=3.30; g-value=0.87; τ=0.81; α=0.4;
		Baixos	CFL	143.2	518.5	PE=0.04m; COB=0.10m; PAV=0m; Uvão=3.30; g-value=0.87; τ=0.81; α=0.8;	119.8	512.6	PE=0.04m; COB=0.07m; PAV=0m; Uvão=3.30; g-value=0.87; τ=0.81; α=0.4;
			LED	128.6	859.2	PE=0.04m; COB=0.10m; PAV=0m; Uvão=3.30; g-value=0.87; τ=0.81; α=0.8;	102.4	852.8	PE=0.04m; COB=0.07m; PAV=0m; Uvão=3.30; g-value=0.87; τ=0.81; α=0.4;
	40	Altos	CFL	191.1	518.1	PE=0.04m; COB=0.10m; PAV=0m; Uvão=3.30; g-value=0.87; τ=0.81; α=0.8;	178.1	514.1	PE=0.04m; COB=0.07m; PAV=0m; Uvão=3.30; g-value=0.87; τ=0.81; α=0.4;
			LED	179.5	858.7	PE=0.04m; COB=0.10m; PAV=0m; Uvão=3.30; g-value=0.87; τ=0.81; α=0.8;	165.2	854.3	PE=0.04m; COB=0.07m; PAV=0m; Uvão=3.30; g-value=0.87; τ=0.81; α=0.4;
		Baixos	CFL	138.0	519.2	PE=0.04m; COB=0.10m; PAV=0m; Uvão=3.30; g-value=0.87; τ=0.81; α=0.8;	114.8	513.6	PE=0.04m; COB=0.07m; PAV=0m; Uvão=3.30; g-value=0.87; τ=0.81; α=0.4;
			LED	126.9	859.9	PE=0.04m; COB=0.10m; PAV=0m; Uvão=3.30; g-value=0.87; τ=0.81; α=0.8;	102.3	853.9	PE=0.04m; COB=0.07m; PAV=0m; Uvão=3.30; g-value=0.87; τ=0.81; α=0.4;
	80	Altos	CFL	197.8	520.5	PE=0.04m; COB=0.10m; PAV=0m; Uvão=3.30; g-value=0.87; τ=0.81; α=0.8;	174.7	515.0	PE=0.04m; COB=0.07m; PAV=0m; Uvão=3.30; g-value=0.87; τ=0.81; α=0.4;
			LED	188.9	861.0	PE=0.04m; COB=0.10m; PAV=0m; Uvão=3.30; g-value=0.87; τ=0.81; α=0.8;	165.1	855.1	PE=0.04m; COB=0.07m; PAV=0m; Uvão=3.30; g-value=0.87; τ=0.81; α=0.4;
		Baixos	CFL	143.5	521.4	PE=0.04m; COB=0.10m; PAV=0m; Uvão=3.30; g-value=0.87; τ=0.81; α=0.8;	109.0	514.1	PE=0.04m; COB=0.07m; PAV=0m; Uvão=3.30; g-value=0.87; τ=0.81; α=0.4;
			LED	134.9	861.9	PE=0.04m; COB=0.10m; PAV=0m; Uvão=3.30; g-value=0.87; τ=0.81; α=0.8;	99.6	854.3	PE=0.04m; COB=0.07m; PAV=0m; Uvão=3.30; g-value=0.87; τ=0.81; α=0.4;

A diminuição do custo global verificado deve-se fundamentalmente à menor exigência da solução construtiva aplicada, nomeadamente, a nível da diminuição da espessura de isolamento e tipo de vão envidraçado, que permite obter níveis mínimos de eficiência energética pelo melhor custo global do edifício.

A variação verificada entre valores de necessidades de energia primária e custo económico, nas soluções de energia mínima e de custo-ótimo, conduz a uma diminuição do desempenho energético da envolvente opaca possível de ser aplicada numa construção. Tal diminuição é verificada pelo aumento existente do valor de U_{global} da envolvente opaca de um valor máximo de 0.14 W/(m²K) (nas soluções de energia mínima) para 0.58 W/(m²K) em Helsínquia, e de 0.58 W/(m²K) para 0.78 W/(m²K) em Lisboa. A diferença existente pode ser prejudicial a nível de consumo energético das construções, nomeadamente, a nível do consumo energético de climatização para aquecimento e/ou arrefecimento. Contudo, uma vez que, se pretende alcançar atingir o menor custo monetário pelo melhor desempenho energético possível da totalidade das variações de soluções energéticas aplicadas à construção, este tipo de soluções pode em alguns casos de edifícios da tipologia de escritórios vir a ser aplicadas, ou dadas como referência.

No que respeita às restantes variáveis em estudo, as soluções de custo-ótimo apresentadas, em termos de necessidades de energia primária e custo global, seguem a tendência de variação evidenciada anteriormente nas soluções de energia mínima. Na Tabela 5.10 apresenta-se uma síntese das melhores soluções de custo-ótimo obtidas.

Tabela 5.10: Síntese das melhores soluções de custo-ótimo obtidas na análise deste modelo. As soluções apresentadas correspondem a uma situação de VH com 2 RPH.

Soluções de custo-ótimo										
	Helsínquia						Lisboa			
GI	Tipo de iluminação	Tipo de sombreamento	WWR [%]	IEE [kWhEP/m ² .ano]	Custo global [€/m ²]	Solução Envolvente	WWR [%]	IEE [kWhEP/m ² .ano]	Custo global [€/m ²]	Solução Envolvente
Alto	CFL	SE	10	196.2	501.2	PE=0.04m; COB=0.10m; PAV=0m; Uvão=3.30; g-value=0.87; τ=0.81; α=0.8;	10	187.1	497.6	PE=0.04m; COB=0.07m; PAV=0m; Uvão=3.30; g-value=0.87; τ=0.81; α=0.4;
	LED		10	180.8	841.8	PE=0.04m; COB=0.10m; PAV=0m; Uvão=3.30; g-value=0.87; τ=0.81; α=0.8;	40	163.4	837.9	PE=0.04m; COB=0.07m; PAV=0m; Uvão=3.30; g-value=0.87; τ=0.81; α=0.4;
Baixo	CFL		10	143.6	502.4	PE=0.04m; COB=0.10m; PAV=0m; Uvão=3.30; g-value=0.87; τ=0.81; α=0.8;	10	121.4	496.7	PE=0.04m; COB=0.07m; PAV=0m; Uvão=3.30; g-value=0.87; τ=0.81; α=0.4;
	LED		10	128.9	843.1	PE=0.04m; COB=0.10m; PAV=0m; Uvão=3.30; g-value=0.87; τ=0.81; α=0.8;	10	103.7	836.8	PE=0.04m; COB=0.07m; PAV=0m; Uvão=3.30; g-value=0.87; τ=0.81; α=0.4;

5.5. Análise de sensibilidade das restantes geometrias

Face aos custos computacionais inerentes a um estudo de todas as combinações de variáveis, na análise de sensibilidade de todas as geometrias dos casos de estudo apresentados, foram utilizados dois métodos de SA: o índice de PCC (método de regressão) e o método de Morris, como detalhado no Capítulo 4. Com esta análise de sensibilidade pretende-se inferir as diferenças existentes entre ambos os métodos na seleção de variáveis que influenciam o desempenho energético dos modelos em estudo. Posteriormente de acordo com os resultados obtidos procede-se à SA dos modelos dos cinco casos de estudo apresentados de forma análoga ao realizado na secção anterior, de modo a responder às questões fundamentais do presente estudo.

5.5.1. Caso de estudo

Os casos de estudo apresentados correspondem aos cinco modelos de edifícios de escritórios formulados na Figura 5.4, Figura 5.7 e Figura 5.8, com as respetivas características geométricas da Tabela 5.1 e Tabela 5.2.

Para uma avaliação da importância das variáveis e do melhor método para realizar a SA, aplicou-se um dos índices dos métodos de regressão (índice PCC) e o método de Morris. Na ótica de obtenção das soluções de energia mínima e custo-ótimo aplicou-se somente o método de Morris, como explicitado na secção 5.5.2 e 5.5.3.

A aplicação destes métodos de SA foi realizada com o software SIMLAB [11]. Este destina-se a efetuar de uma forma mais rápida análises de sensibilidade e incertezas de modelos numéricos, tendo já sido aplicada em estudos de desempenho energético de edifícios, como evidenciado no Capítulo 4. Deste modo, é possível gerar uma amostragem de valores de vários parâmetros consoante o pretendido pelo utilizador, que são posteriormente simuladas com o apoio da ferramenta JEplus. Por fim, os resultados são submetidos a uma análise de SA segundo o método correspondente de análise de sensibilidade previamente escolhido na ferramenta.

A obtenção dos custos globais das soluções de componentes aplicadas nesta secção foi conseguida de forma análoga ao já referido na secção 5.4.

5.5.2. Análise de sensibilidade

5.5.2.1. Método de Regressão - Índice de PCC

Na aplicação do método de SA de regressão para averiguar a importância das variáveis em estudo, recorreu-se ao indicador PCC, já referenciado no Capítulo 4. Este coeficiente de correlação é obtido com base em correlações completas e correlações parciais, representando a força de correlação linear entre as duas variáveis de correlação, excluindo todos os efeitos das variáveis independentes entre si [100]. Deste modo, é possível atribuir uma ordem de importância das variáveis no desempenho energético do edifício excluindo os efeitos da interação entre as mesmas.

A classificação da importância de uma variável em relação é realizada pela comparação do índice de PCC obtido para cada uma. Os resultados obtidos são entendidos por quanto mais positivo o resultado do índice de PCC para o dado parâmetro, maior a sua importância para a questão em análise, e por sua vez, quanto mais negativo for o valor do índice obtido, a conclusão inversa na análise deverá ser retirada.

Na Tabela 5.3 são apresentadas as variáveis independentes utilizadas no presente estudo de simulação, com a referida função de probabilidade atribuída para efeitos de aplicação dos métodos de SA da presente secção. Para efeitos de confiança na amostragem gerada para este método, aplicou-se um intervalo de 95 %.

A aplicação deste método recorreu a uma amostragem aleatória *Latin Hypercube* [101], que permite gerar vetores aleatórios para cada uma das variáveis independentes, considerando a probabilidade de ocorrência em cada distribuição da Tabela 5.3. O tamanho do espaço de amostragem não se encontra

diretamente associado ao número de simulações no método de regressão, assim sendo, adotou-se um valor de 130 amostras na situação de VM, e de 140 amostras na situação de VH, como forma de equiparação ao posterior valor a utilizar na aplicação do método de Morris.

Na Figura 5.22 é possível analisar a classificação de importância das variáveis no desempenho energético dos modelos, ou seja, relativamente ao indicador energético IEE, segundo este método, para as duas localizações e na situação de VM e VH. Os valores numéricos respetivos aos índices apresentados na Figura 5.22 encontram-se resumidos na Tabela A.17.

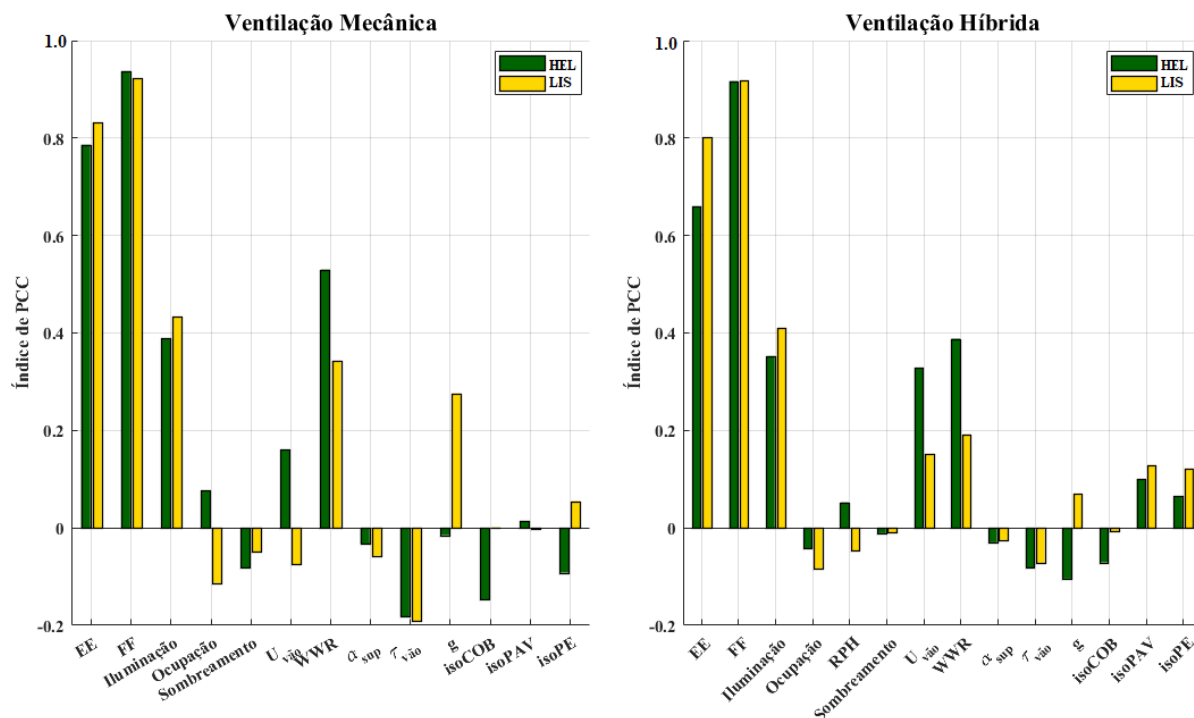


Figura 5.22: Valores de índices de PCC obtidos para a situação de VM e VH nas duas localizações em estudo.

Pela análise da Figura 5.22 constata-se que no caso de Helsínquia as variáveis FF, EE e WWR apresentam um maior peso, em ambas as situações. No caso da localização de Lisboa, as variáveis FF, EE e Iluminação são as que detêm maior impacto nas necessidades de energia primária. Este facto corresponde ao esperado no desempenho energético de um edifício, verificando-se que o design das proporções da estrutura e dos seus vãos envidraçados pesam nas suas necessidades de energia pela influência que estes apresentam nas componentes de uso de climatização e iluminação dos espaços. Igualmente se verifica que a eficiência da sua operação é fundamental, tendo em conta a importância que os GI pela utilização de EE e de iluminação apresentam em ambas as localizações.

Por sua vez, verifica-se a atribuição de uma menor importância às componentes de isolamento das superfícies opacas e características dos vãos envidraçados, em ambos os locais. Este facto poderá derivar do erro associado à aplicação destes métodos, devido à natureza aleatória de geração da amostra.

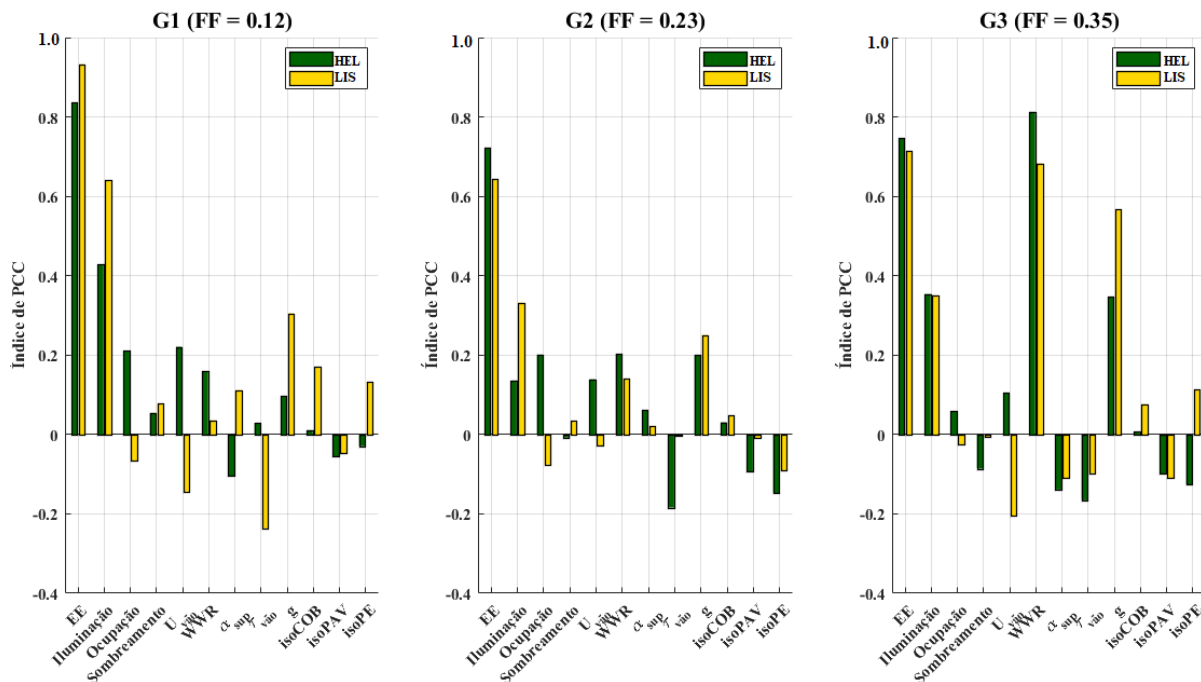


Figura 5.23: Valores de índices de PCC obtidos para a situação de VM, nas duas localizações em estudo para os três FF em estudo.

Na Figura 5.23 apresenta-se a classificação das variáveis em estudo, para a situação de VM, nas três geometrias com variação de FF. Os resultados numéricos dos índices apresentados na Figura 5.23 encontram-se resumidos na Tabela A.18.

É notório, uma vez mais, que em ambas as localizações e para ambos os modelos os parâmetros de EE, Iluminação e WWR apresentam uma maior importância devido ao acima referido. Nestes resultados verifica-se a importância do $U_{vão}$ na localização de Helsínquia, e do g em Lisboa. Este facto poderá dever-se à diferença de ganhos solares a que as construções nestes locais se encontram sujeitas, uma vez que em Helsínquia há menores ganhos solares e consequentemente uma maior necessidade de contenção das perdas térmicas pela envolvente não-opaca, conduzindo a um maior peso do valor de U na construção. Por outro lado, em Lisboa é necessário um maior controlo dos ganhos solares, pelo que o valor de g ganha uma maior importância no desempenho energético dos edifícios.

Em oposição, as variáveis de $\tau_{vão}$ e de α_{sup} , apresentam uma importância muito reduzida face às restantes variáveis no desempenho energético das construções. Este resultado advém destes parâmetros serem características de superfícies do edifício, não apresentado assim um peso significativo no desempenho energético destas que possam influenciar a construção no seu global.

No que diz respeito à influência que a variável FF apresenta na classificação da importância das variáveis em estudo, verifica-se que os principais parâmetros apresentam um maior peso no desempenho energético do modelo com menor fator de forma. Contudo, na generalidade dos resultados obtidos, um maior número de variáveis detém um valor mais elevado de índice no edifício com maior fator. Este facto permite inferir que a arquitetura do edifício apresenta uma influência determinante nas necessidades de energia de uma construção.

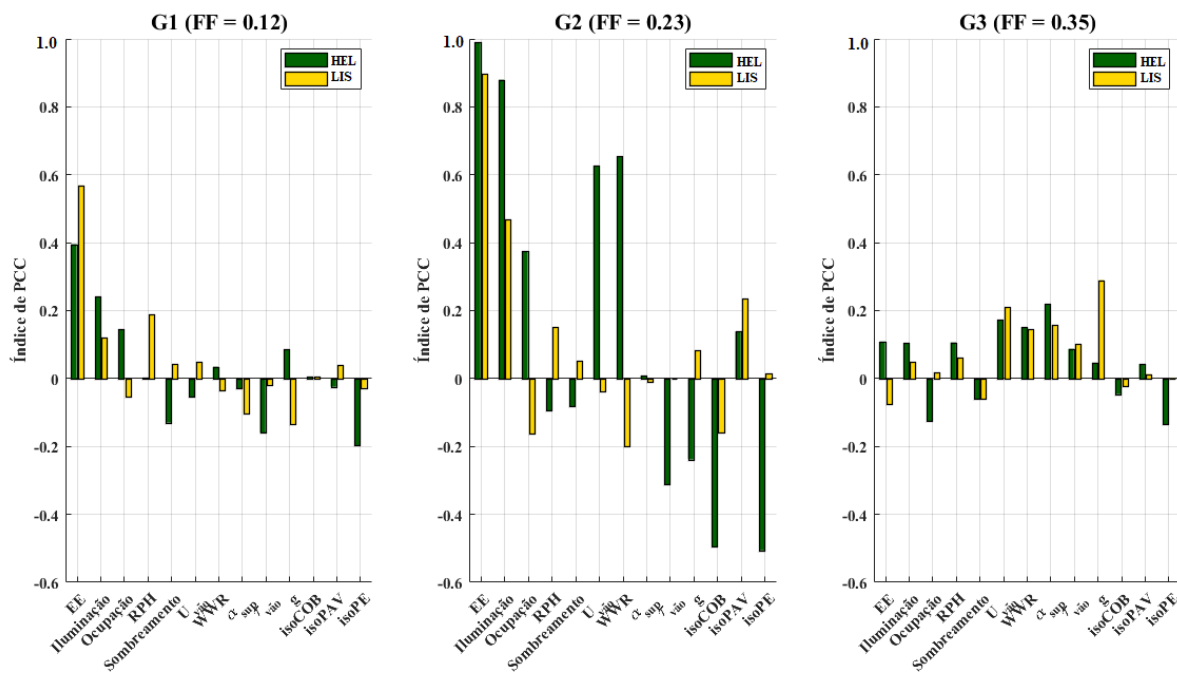


Figura 5.24: Valores de índices de PCC obtidos para a situação de VH nas duas localizações em estudo para os três FF em estudo.

Numa situação de VH, como apresentado Figura 5.24, verifica-se uma maior variação na importância das variáveis, nomeadamente, por influência do aumento de FF, além da natural influência das condições climáticas exteriores. Tal poderá dever-se à introdução de VN não produzir um efeito tão positivo em espaços com maior profundidade como em espaços menos profundos, o que induz uma alteração na importância dos parâmetros em estudo. Os resultados numéricos representados na Figura 5.24 encontram-se na Tabela A.19.

5.5.2.2. Método de Morris

A análise de sensibilidade pelo método de Morris, como discutido no Capítulo 4, permite a aplicação de um método de SA que se ajusta mais facilmente a qualquer conjunto de dados e uma maior fiabilidade nos resultados.

A aplicação deste método recorreu a uma amostragem aleatória, que permitiu gerar um vetor de valores para cada uma das variáveis independentes considerando a probabilidade de ocorrência em cada distribuição da Tabela 5.3. O tamanho do espaço de amostragem considerado foi o de 130 amostras na situação de VM, e de 140 amostras na situação de VH, correspondendo ao valor recomendado de simulações do modelo de $r*(k+1)$ [54]. Para efeitos de confiança na amostragem gerada para este método, aplicou-se um intervalo de 95 %.

Na Figura 5.25 é apresentada a variação dos parâmetros em estudo segundo os dois indicadores deste método, μ (valor médio) e σ (desvio-padrão), em que o primeiro permite atribuir uma classificação por ordem de importância de cada uma das variáveis independentes, e o segundo disponibiliza informação do desvio causado devido à interação da variável com as restantes no modelo. Os valores numéricos respetivos aos índices deste método representados na Figura 5.25 encontram-se resumidos na Tabela A.20.

Por conseguinte, é possível verificar pela aplicação deste método a influência que FF apresenta no desempenho energético da construção face às restantes variáveis, com uma influência de cerca de 450 kWh_{EP}/m².ano na localização de Lisboa e de 320 kWh_{EP}/m².ano em Helsínquia. Estes valores, face aos valores dos restantes parâmetros em análise que não apresentam uma influência nas necessidades de energia da construção em mais de 100 kWh_{EP}/m².ano em ambos os locais, e em conjunto com o facto da influência de FF depender da interação com as restantes variáveis, permite corroborar a importância crucial que o FF apresenta no desempenho energético das edificações em estudo. Deste modo, pode-se inferir que este representa uma influência nas necessidades de energia primária da construção de até 80%.

Dada a crucialidade deste fator, é possível afirmar que as arquiteturas da tipologia de edifícios de escritórios apresentadas pelos EM, não se encontram adaptadas ao objetivo de construções de elevado desempenho energético. Por conseguinte, e com o intuito de aumentar o desempenho destes edifícios, é necessária uma melhor conceção dos modelos de edifícios em estudo, de forma, a aumentar as exigências construtivas dos edifícios novos e das reabilitações em curso.

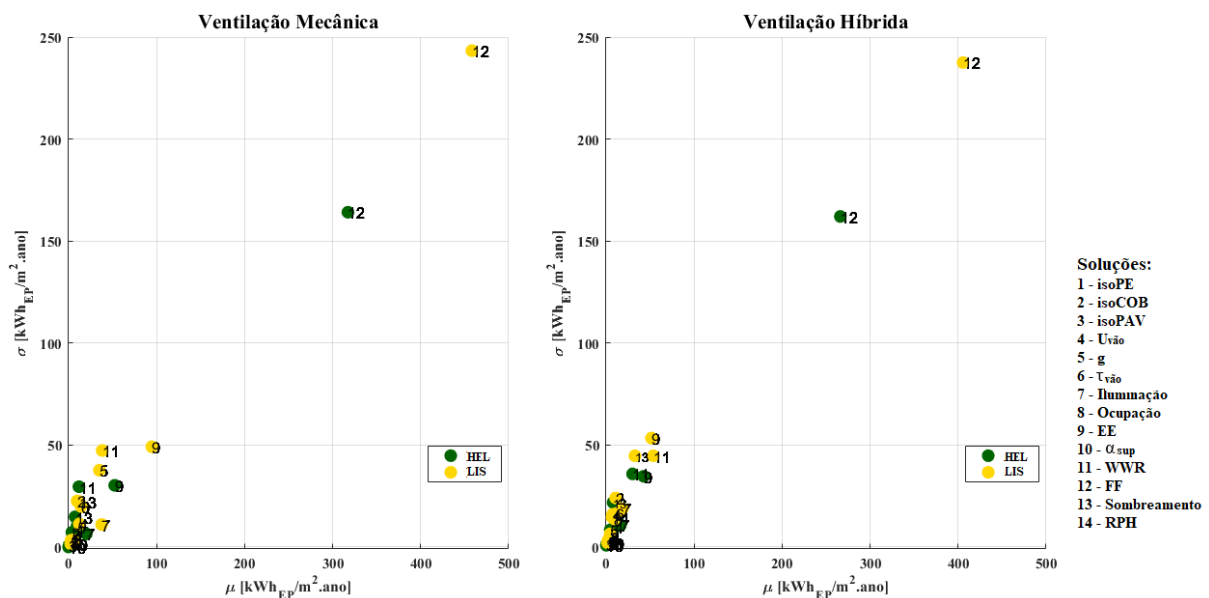


Figura 5.25: Índices obtidos pelo método de Morris para análise de sensibilidade da importância das variáveis em estudo, nas situações de VM e VH nas localizações de Helsínquia (à verde) e Lisboa (à amarelo).

Na presente análise é ainda possível verificar que a variável FF, apresenta uma maior importância nas condições climáticas de Lisboa face às de Helsínquia. Tal poderá dever-se às formas extremamente poligonais que os casos de estudo apresentam, que não permitem um maior aproveitamento de fachada sul e impedem consequentemente, o beneficiar das características climáticas desta localização para o melhoramento do desempenho energético da construção.

Igualmente se verifica a importância mais dominante das variáveis de EE e WWR nas duas situações de simulação distintas (VM e VH), e condições climáticas. Este domínio ressalva a importância destas componentes nas necessidades de energia das construções, e da necessidade de serem priorizadas para o acesso aos níveis de energia mínima ambicionados pela UE.

Numa situação de VH verifica-se uma dominância das variáveis em estudo semelhante a situação de VM, sem uma maior relevância da variável de RPH. Este resultado permite inferir que a influência deste parâmetro encontra-se dependente da influência dos restantes em análise, nomeadamente, dos GI por ocupação e EE.

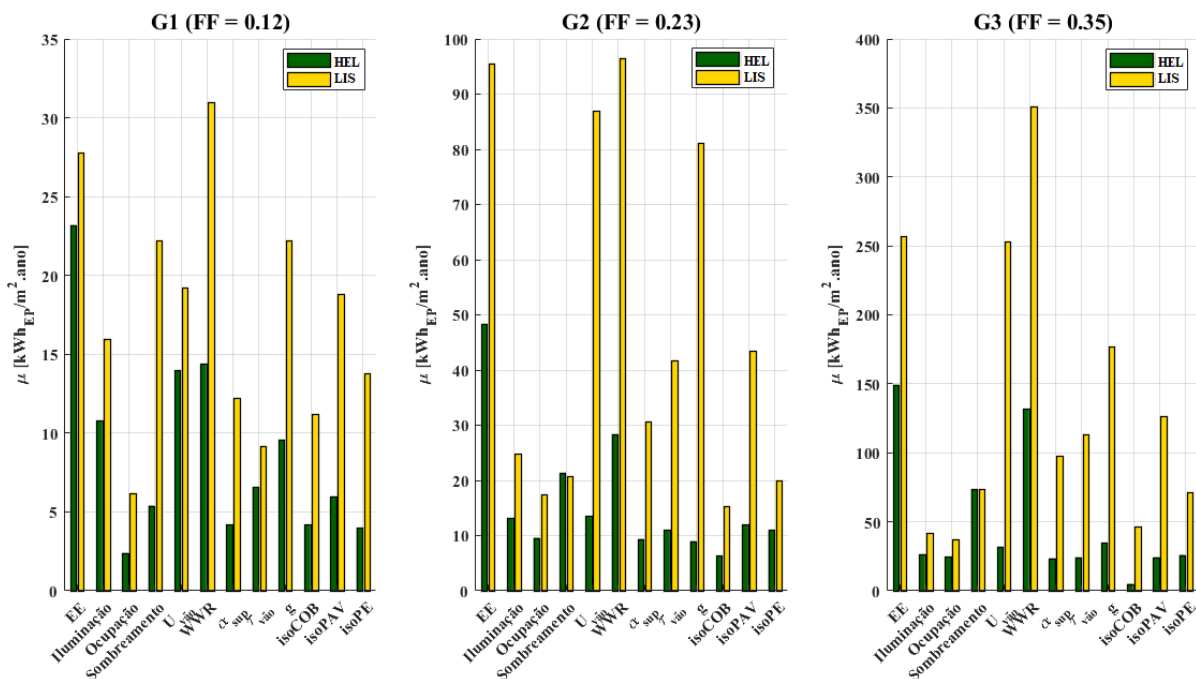


Figura 5.26: Classificação da importância dos parâmetros em estudo segundo o método de Morris para os três valores de FF em variação na situação de VM para as duas localizações.

A Figura 5.26 apresenta a classificação da importância dos parâmetros em estudo para os três modelos de edifícios com variação de FF, nas duas localizações, cujos valores numéricos se encontram resumidos na Tabela A.21.

A selecção dos parâmetros que mais afetam o desempenho energético da construção por este método evidencia que as variáveis de EE, WWR, $U_{vão}$, e Iluminação são as que detêm maior peso nas condições climáticas de Helsínquia. Por outro lado, é notório um acréscimo da importância do sombreamento à medida que o valor de FF aumenta, diminuindo o peso da variável de iluminação nas necessidades de energia primária. Este facto poderá dever-se à diminuição da profundidade dos espaços com o aumento de FF, que se traduz na necessidade de um maior controlo da componente de iluminação natural, bem como de uma maior exigência a nível dos vãos envidraçados, nomeadamente, do valor de $U_{vão}$ como já referido nas secções anteriores.

Nas condições climáticas de Lisboa evidencia-se que os parâmetros de WWR, EE, $U_{vão}$, g e sombreamento detêm uma maior importância face aos restantes parâmetros. Esta selecção resulta das necessidades de resposta térmica que uma edificação nesta localização detém, uma vez que, os parâmetros referentes aos vãos envidraçados são de extrema importância para controlo dos ganhos solares, bem como dos níveis de iluminação interior.

Estes resultados atribuem uma menor importância aos aspetos de isolamento das superfícies opacas, que são traduzidos pelo valor de U da respetiva envolvente, bem como, da α_{sup} , $\tau_{vão}$ e ocupação. Esta

atribuição de um menor peso à ocupação do edifício deve-se fundamentalmente à incerteza associada a esta variável, que não permite uma quantificação correta da sua influência no desempenho energético por este método. A menor relevância das restantes variáveis referidas encontra-se dentro do esperado, tendo em conta o verificado na análise de SA do método anterior.

Nos resultados apresentados na Figura 5.26, verifica-se ainda que à medida que FF aumenta as variáveis em estudo não sofrem alterações de maior ao nível da sua classificação de importância, contudo, o seu valor de indicador de média aumenta em cerca de 50% e 70% na localização de Helsínquia, ao aumentar do valor de FF de 0.12 para 0.23, e de 0.23 para 0.35, respetivamente, e em 70% e 65% na localização de Lisboa no incremento no valor de FF referido.

Este facto permite corroborar uma vez mais o acima referido na discussão da Figura 5.25, da importância que a definição de proporções satisfatórias apresenta no desempenho energético de um edifício, uma vez que, quanto maior a variável FF, ou seja, quanto menor a compactacidade de uma edificação, maior a reflexão nas suas necessidades de energia, mesmo detendo aplicações de estratégias de eficiência energética passivas e/ou ativas.

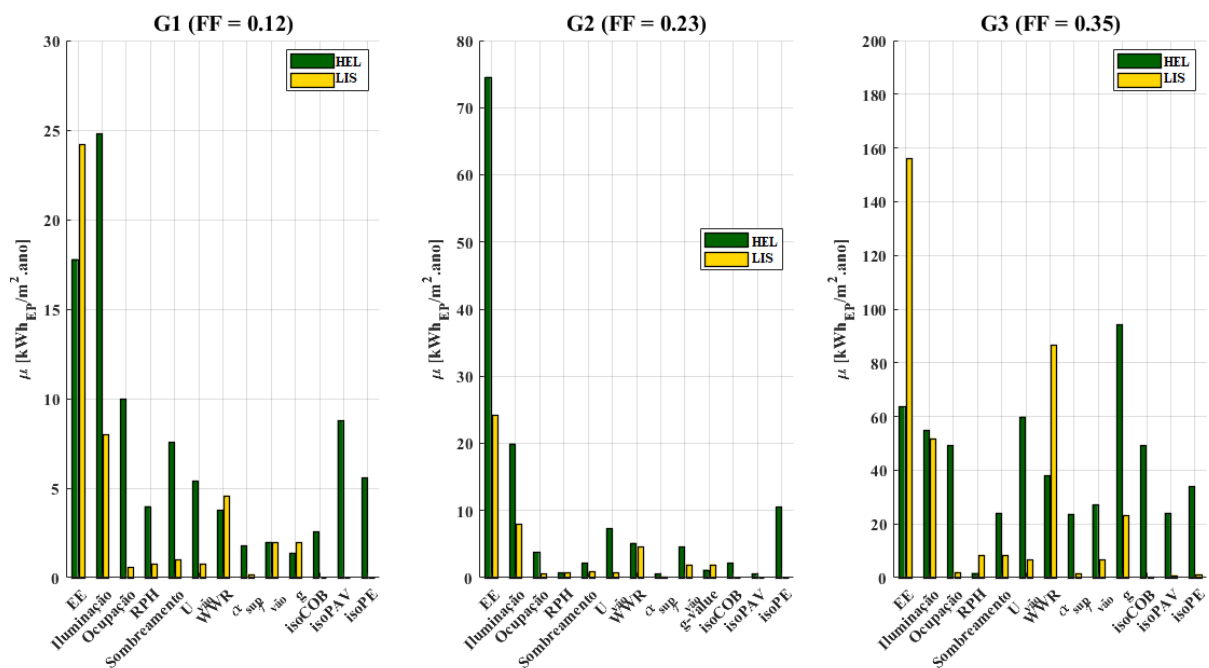


Figura 5.27: Classificação da importância dos parâmetros em estudo segundo o método de Morris para os três valores de FF em variação, na situação de VH para as duas localizações.

Na Figura 5.27 apresenta-se a classificação da importância das variáveis em estudo, após a introdução da estratégia de ventilação natural. Os resultados numéricos obtidos são apresentados na Tabela A.22, e evidenciam que a introdução desta componente na SA para seleção de variáveis não conduz a uma classificação semelhante dos parâmetros em estudo em relação a VM.

Este facto pode ocorrer, como referido na secção 5.4, devido à introdução de uma nova variável ‘RPH’ que diminui as necessidades de energia das construções e, simultaneamente, diminui a importância relativa dos parâmetros em estudo nas duas localizações.

Em suma, os dois métodos de SA apresentados proporcionam uma selecção de variáveis que conduz ao esperado da resposta térmica de modelos de edifícios nas situações de simulação apresentadas, permitindo assim demonstrar a importância que as variáveis respeitantes à geometria dos edifícios, nomeadamente as variáveis de FF e WWR, apresentam no desempenho energético destes. Contudo, para a selecção de soluções de energia mínima e custos-ótimos dos modelos de edifícios em estudo, a opção recai pelas soluções do método de Morris, pois este permitiu a identificação mais assertiva com o conhecimento do desempenho energético de edifícios apresentado no Capítulo 3, já tendo sido utilizado com sucesso noutros estudos deste tipo, como referenciado no Capítulo 4.

Por conseguinte, na aplicação do método de Morris para selecção de soluções de energia mínima e de custo-ótimo, segundo a metodologia apresentada e aplicada na secção 5.4, são apresentados dois conjuntos de resultados, respetivamente. Estes foram selecionados para os cinco casos de estudo, nas duas localizações estabelecidas, e nas situações de simulação VM e VH encontrando-se na Tabela 5.11 e Tabela 5.12.

Tabela 5.11: Soluções de energia mínima para os cinco casos de estudo, na localização de Helsínquia e Lisboa, extrapoladas pelo método de Morris para SA.

Localização	Modelo	isoPE [m]	isoCOB [m]	isoPAV [m]	U _{vão} [W/m ² K]	g	τ _{vão}	Iluminação - Zona de Trabalho [W/m ²]	GI - Ocupação [m ² /pessoa]	GI - EE [W/m ²]	α _{sup}	WWR [%]	Tipo de Sombreamento	Ventilação		IEE [kWh/m ² .ano]	Custo Global [€/m ²]
														Tipo	RPH		
Helsínquia	G1 (FF = 0.12)	0.15	0.40	0.10	1.60	0.29	0.43	5.60	7.5	7.5	0.4	10	Interno	Mecânica	0.0	65.3	693.8
	G2 (FF = 0.23)	0.15	0.40	0.10	1.60	0.29	0.43	5.60	7.5	15.0	0.4	10	Interno	Mecânica	0.0	94.7	696.2
	G3 (FF = 0.35)	0.15	0.40	0.10	2.80	0.29	0.12	5.60	15.0	7.5	0.4	10	Interno	Mecânica	0.0	115.7	702.6
	GA1 (FF = 0.23)	0.15	0.40	0.10	1.60	0.29	0.43	5.60	7.5	7.5	0.4	40	Interno	Mecânica	0.0	104.2	698.1
	GA2 (FF = 0.23)	0.15	0.40	0.10	1.60	0.29	0.43	5.60	7.5	7.5	0.4	10	Interno	Mecânica	0.0	93.7	694.3
Lisboa	G1 (FF = 0.12)	0.30	0.15	0.0	2.80	0.40	0.45	5.60	15.0	7.5	0.8	40	Interno	Mecânica	0.0	87.2	658.6
	G2 (FF = 0.23)	0.15	0.40	0.00	2.80	0.29	0.12	5.60	15.0	7.5	0.4	40	Externo	Mecânica	0.0	129.3	995.6
	G3 (FF = 0.35)	0.15	0.40	0.10	2.80	0.29	0.12	5.60	15.0	7.5	0.4	40	Externo	Mecânica	0.0	158.2	1002.6
	GA1 (FF = 0.23)	0.30	0.15	0.00	2.80	0.40	0.45	5.60	15.0	7.5	0.8	40	Interno	Mecânica	0.0	130.5	662.4
	GA2 (FF = 0.23)	0.30	0.15	0.00	2.80	0.40	0.45	5.60	15.0	7.5	0.8	80	Interno	Mecânica	0.0	113.8	659.5
Helsínquia	G1 (FF = 0.12)	0.30	0.20	0.00	1.60	0.59	0.43	5.60	7.5	7.5	0.8	10	Interno	Híbrida	2.0	51.5	525.5
	G2 (FF = 0.23)	0.30	0.20	0.10	1.60	0.47	0.45	5.60	7.5	7.5	0.4	10	Externo	Híbrida	5.6	68.9	961.9
	G3 (FF = 0.35)	0.30	0.20	0.10	1.60	0.47	0.45	5.60	7.5	7.5	0.4	10	Externo	Híbrida	5.6	107.5	985.3
	GA1 (FF = 0.23)	0.15	0.35	0.00	1.60	0.59	0.61	5.60	15.0	7.5	0.4	40	Externo	Híbrida	2.0	70.6	831.1
	GA2 (FF = 0.23)	0.30	0.20	0.10	1.60	0.47	0.45	5.60	7.5	7.5	0.4	10	Externo	Híbrida	5.6	84.8	963.9
Lisboa	G1 (FF = 0.12)	0.10	0.35	0.00	2.80	0.40	0.36	5.60	7.5	7.5	0.8	80	Externo	Híbrida	5.6	62.0	956.5
	G2 (FF = 0.23)	0.02	0.15	0.00	1.60	0.14	0.61	5.60	15.0	7.5	0.4	80	Interno	Híbrida	2.0	97.8	661.0
	G3 (FF = 0.35)	0.10	0.35	0.00	2.80	0.40	0.36	5.60	7.5	7.5	0.8	40	Externo	Híbrida	5.6	136.3	1001.9
	GA1 (FF = 0.23)	0.10	0.35	0.00	2.80	0.40	0.81	5.60	7.5	7.5	0.8	80	Externo	Híbrida	5.6	100.4	973.0
	GA2 (FF = 0.23)	0.10	0.35	0.00	2.80	0.40	0.81	5.60	7.5	7.5	0.8	40	Externo	Híbrida	5.6	104.1	956.9

As soluções de energia mínima acima apresentadas e extrapoladas pela aplicação deste método apresentam uma melhor selecção de soluções face às da análise da secção 5.4, quando se comparam os resultados para o modelo G2. Este resultado deve-se à lacuna que a aplicação deste método suscita ao somente possibilitar um número reduzido de simulações. Esta contrariedade do método que por um lado torna a SA mais rápida, face a uma SA de resultados que necessita de um processo de simulação energética mais complexo e moroso, impossibilita o estudo completo do universo de soluções possíveis dado os parâmetros em estudo da Tabela 5.3.

O espaço de amostragem gerado por este método também sofre alterações relativamente ao da secção 5.4 ao adicionar novas combinações de variáveis, originando assim novas soluções de componentes do edifício diferentes das exploradas na análise de SA anterior. Este facto resulta da natureza aleatória da amostra gerada relativamente aos seus valores de entrada, o que conduz a diferentes combinações a nível de valores de GI de ocupação e EE e de parâmetros dos vãos envidraçados.

As soluções apresentadas na Tabela 5.11 evidenciam, uma vez mais, o aumento crescente das necessidades de energia primária da construção com o aumento de FF. É ainda patente que a introdução

de soluções arquitetónicas mais próximas de uma alternativa passiva, como um espaço de átrio no edifício, pode ser favorável na redução do consumo energético.

A aplicação desta solução geométrica apresenta um impacto significativo quando em conjunto com uma estratégia de VN no edifício, permitindo o modelo GA1 reduzir as necessidades de energia primária em 25% na localização de Helsínquia e 22% em Lisboa. O modelo GA2 permite uma redução no consumo energético de 10% em Helsínquia e 20% em Lisboa. Contudo, estes resultados são somente indicativos do potencial de redução do consumo energético, uma vez que a comparação entre as soluções obtidas não é estabelecida na mesma combinação de variáveis, dada a natureza aleatória da amostra analisada.

Os presentes resultados permitem igualmente aferir que a obtenção dos níveis de energia mínima não se encontra dependente da área de pavimento do edifício ou do seu número de piso, uma vez que nos modelos em estudo a área de pavimento é menor à medida que FF aumenta.

A nível da seleção das soluções construtivas das superfícies opacas e não-opacas, verifica-se que as que garantem níveis mínimos de energia são no caso da localização de Helsínquia soluções com menor valor de U (notório pela necessidade de maior espessura de isolamento nas superfícies, e menor valor de U do vão envidraçado) e com valores de g e $\tau_{\text{vão}}$ médios, de modo a permitir ganhos solares controlados para atenuar as necessidades de energia para aquecimento da construção quando possível. Igualmente se evidencia a seleção de iluminação LED, devido à sua maior eficiência face à iluminação CFL, e de GI médios (aproximadamente, 24 W/m² no total da componente de ocupação e EE). No que respeita ao fator de WWR, o que permite obter melhores soluções é de 10% robustecendo o verificado nas análises anteriores para esta variável.

Na localização de Lisboa, verifica-se uma diminuição na exigência da envolvente opaca e não-opaca devido às condições climáticas mais favoráveis. Esta evidência é principalmente notada com o aumento de WWR, e do valor de $U_{\text{vão}}$ face à localização em Helsínquia. Nos restantes parâmetros, as soluções encontradas foram bastante semelhantes às acima referidas. Este facto permite inferir a importância da envolvente opaca e não-opaca nas necessidades de energia e no alcance de uma solução passiva global para o edifício, sem necessidade de sistemas ativos de energia.

Na situação de VH, verifica-se a mesma cadência de resultados referidos para a situação de VM, com um notório decréscimo das necessidades de energia primária. Este facto suporta a importância da aplicação de estratégias de VN para o atingir de níveis mínimos de energia e para a aproximação do edifício a um comportamento energético passivo.

É de ressaltar que nenhuma destas soluções detém a aplicação de FER, o que indica que a aplicação destas fontes de energia permitiria facilmente atingir edifícios de elevado desempenho energético, ou nZEB. De forma semelhante, os resultados obtidos para as melhores soluções, isto é, para a geometria que melhor satisfaz a condição de desempenho energético otimizado por um menor custo, encontra-se abaixo do valor médio dos relatórios nacionais do EM [8]. Este facto indica assim a possibilidade que estes detêm de melhorar os seus ER, de modo a aumentar as exigências da sua legislação nacional no âmbito do desempenho energético das suas edificações.

5.5.3. Soluções de custo-ótimo

As soluções de custo-ótimo obtidas que permitem inferir os níveis mínimos de rentabilidade de medidas de eficiência energética dos modelos em análise, encontram-se sumariadas na Tabela 5.12.

Tabela 5.12: Soluções de custo-ótimo para os cinco casos de estudo, na localização de Helsínquia e Lisboa extrapoladas pelo método de Morris para SA.

Localização	Modelo	isoPE [m]	isoCOB [m]	isoPAV [m]	U _{vão} [W/m ² K]	g	τ _{vão}	Iluminação - Zona de Trabalho [W/m ²]	GI - Ocupação [m ² /pessoa]	GI - EE [W/m ²]	α _{sup}	WWR [%]	Tipo de Sombreamento	Ventilação		IEE [kWh/m ² .ano]	Custo Global [€/m ²]
														Tipo	RPH		
Helsínquia	G1 (FF = 0.12)	0.20	0.20	0.20	2.80	0.87	0.34	9.26	15.0	7.5	0.4	10	Interno	Mecânica	0	77.2	213.6
	G2 (FF = 0.23)	0.20	0.20	0.20	2.80	0.87	0.34	9.26	15.0	7.5	0.4	10	Interno	Mecânica	0	110.2	234.3
	G3 (FF = 0.35)	0.20	0.20	0.20	2.80	0.87	0.34	9.26	15.0	7.5	0.4	10	Externo	Mecânica	0	138.3	240.9
	GA1 (FF = 0.23)	0.20	0.20	0.20	2.80	0.87	0.34	9.26	15.0	7.5	0.4	40	Interno	Mecânica	0	130.3	219.1
	GA2 (FF = 0.23)	0.20	0.20	0.20	2.80	0.87	0.34	9.26	15.0	7.5	0.4	80	Interno	Mecânica	0	103.7	214.9
Lisboa	G1 (FF = 0.12)	0.02	0.10	0.2	2.80	0.87	0.81	9.26	15.0	15.0	0.4	10	Interno	Mecânica	0	101.1	205.4
	G2 (FF = 0.23)	0.02	0.10	0.20	2.80	0.87	0.81	9.26	15.0	15.0	0.4	10	Interno	Mecânica	0	151.3	208.7
	G3 (FF = 0.35)	0.20	0.20	0.20	2.80	0.87	0.34	9.26	15.0	7.5	0.4	10	Interno	Mecânica	0	193.4	224.0
	GA1 (FF = 0.23)	0.02	0.10	0.20	2.80	0.87	0.81	9.26	15.0	15.0	0.4	40	Interno	Mecânica	0	152.1	212.1
	GA2 (FF = 0.23)	0.02	0.10	0.20	2.80	0.87	0.81	9.26	15.0	15.0	0.4	10	Interno	Mecânica	0	134.4	209.1
Helsínquia	G1 (FF = 0.12)	0.15	0.35	0.00	2.80	0.29	0.61	9.26	15.0	7.5	0.8	10	Interno	Híbrida	2	60.3	182.2
	G2 (FF = 0.23)	0.15	0.35	0.00	2.80	0.29	0.61	9.26	15.0	7.5	0.8	10	Interno	Híbrida	2	93.6	187.3
	G3 (FF = 0.35)	0.15	0.35	0.00	2.80	0.29	0.61	9.26	15.0	7.5	0.8	10	Interno	Híbrida	2	128.8	201.5
	GA1 (FF = 0.23)	0.15	0.35	0.00	2.80	0.59	0.61	9.26	15.0	7.5	0.8	80	Interno	Híbrida	2	101.0	190.3
	GA2 (FF = 0.23)	0.15	0.35	0.00	2.80	0.59	0.61	9.26	15.0	7.5	0.8	40	Interno	Híbrida	2	94.2	189.1
Lisboa	G1 (FF = 0.12)	0.15	0.35	0.00	2.80	0.59	0.61	9.26	15.0	7.5	0.8	80	Interno	Híbrida	2	73.8	182.9
	G2 (FF = 0.23)	0.15	0.35	0.00	2.80	0.59	0.61	9.26	15.0	7.5	0.8	80	Interno	Híbrida	2	146.8	189.1
	G3 (FF = 0.35)	0.15	0.35	0.00	2.80	0.59	0.61	9.26	15.0	7.5	0.8	40	Interno	Híbrida	2	183.7	211.4
	GA1 (FF = 0.23)	0.15	0.35	0.00	2.80	0.59	0.61	9.26	15.0	7.5	0.4	80	Interno	Híbrida	2	113.8	191.2
	GA2 (FF = 0.23)	0.15	0.35	0.00	2.80	0.59	0.61	9.26	15.0	7.5	0.4	80	Interno	Híbrida	2	116.9	191.2

Dado o conjunto de soluções obtidas pelo método de Morris, e de forma semelhante ao realizado na análise de SA da secção 5.4, torna-se útil a análise dos modelos em estudo ao nível do seu fracionamento de consumo energético nas várias componentes de dispêndio energético da construção, para as melhores soluções de energia mínima e custo-ótimo nas duas localizações em estudo.

A Figura 5.28 representa o fracionamento energético do consumo dos modelos em estudo, ao nível dos três modelos com variação de FF. As melhores soluções obtidas, tanto de energia mínima como de custo-ótimo, correspondem à situação de simulação com VH.

Os resultados apresentados evidenciam que o consumo energético total de uma construção é dependente da sua área útil total, uma vez que, à medida que esta diminui nos modelos, o consumo do edifício diminui. Igualmente, verifica-se que uma fração elevada do consumo energético dos modelos correspondente às componentes de iluminação e equipamentos elétricos, o que corrobora os resultados obtidos ao longo da análise efetuada ao nível do desempenho energético das construções, e dos fatores que mais importância detêm nesta variável.

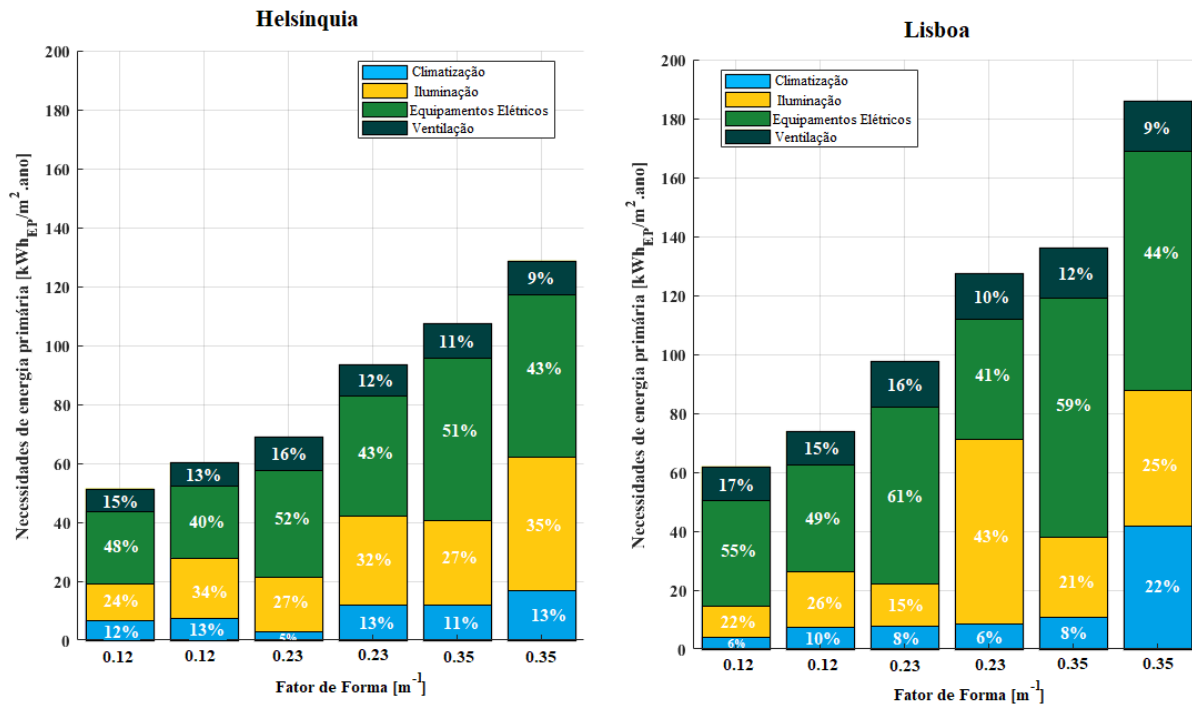


Figura 5.28: Comparação das necessidades de energia primária nas diferentes componentes de uso do edifício, para a melhor solução a nível de energia mínima (coluna à esquerda do par) (Tabela 5.11) e custo-ótimo (coluna à direita do par) (Tabela 5.12) das três geometrias (G1, G2 e G3) com variação do parâmetro FF, nas duas localizações em estudo.

Os resultados apresentados na Figura 5.29 evidenciam a vantagem que a utilização de opções arquitetónicas distintas detém no desempenho energético dos edifícios. As melhores soluções obtidas, tanto de energia mínima como de custo-ótimo, correspondem à situação de simulação com VH.

Em ambas as localizações em análise existe uma diminuição significativa do consumo energético nos modelos GA1 e GA2 por comparação com G2, com uma notória vantagem do modelo GA1 face a GA2, devido à redução da componente de iluminação no dispêndio de energia da construção. Este resultado permite assim afirmar que a aplicação de geometrias com esta forma possibilita o acesso mais facilitado a iluminação natural para manutenção dos níveis de iluminação necessários.

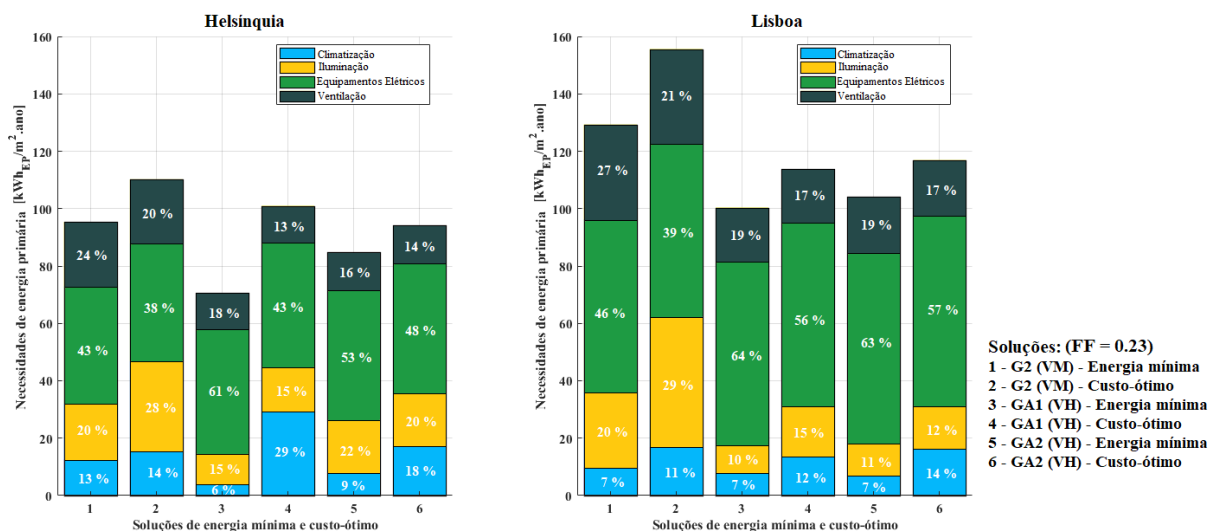


Figura 5.29: Comparação das necessidades de energia primária nas diferentes componentes de uso do edifício, para a melhor solução a nível de energia mínima (Tabela 5.11) e custo-ótimo (Tabela 5.12) nos modelos G2 e modelos de edifícios átrios correspondentes, nas duas localizações em estudo.

No conjunto de resultados obtidos verifica-se um aumento das necessidades de energia primária, e um decréscimo do desempenho energético dos componentes aplicados, tanto na situação de simulação de VM como de VH. Contudo, obtêm-se resultados satisfatórios para a otimização da função energia-custo, e comparando os resultados da SA da secção 5.4 e os presentes no modelo G2, pode-se afirmar que é possível alcançar níveis de custo-ótimo bastante baixos com soluções aplicadas ao edifício que possibilitam uma resposta térmica da construção a nível de envolvente opaca e não-opaca e iluminação.

Tabela 5.13: Impacto nas necessidades de energia primária das melhores soluções de energia mínima e custo-ótimo evidenciadas na Tabela 5.6 e Tabela 5.7 para a análise de sensibilidade detalhada do modelo de edifício G2 (FF= 0.23) da secção 5.4.2, face ao valor de IEE médio (175 kWhEP/m2.ano) dos relatórios dos EM realizados no âmbito da diretiva..

SA detalhada		
	Helsinki	Lisboa
Energia mínima	+4% a -34%	-2% a -46%
Custo-ótimo	+12% a -16%	+5% a -40%

Tabela 5.14: Impacto nas necessidades de energia primária das melhores soluções de energia mínima e custo-ótimo evidenciadas na Tabela 5.11 e Tabela 5.12 para a análise de sensibilidade efetuado pelo método de Morris na secção 5.5.2.2, face ao valor de IEE médio (175 kWh_{EP}/m².ano) dos relatórios dos EM realizados no âmbito da diretiva.

SA Morris		
Energia mínima		
Modelos	Helsínquia	Lisboa
G1 (FF = 0.12)	-70%	-65%
G2 (FF = 0.23)	-61%	-44%
G3 (FF = 0.35)	-38%	-22%
GA1 (FF = 0.23)	-60%	-43%
GA2 (FF = 0.23)	-52%	-41%
Custo-ótimo		
G1 (FF = 0.12)	-66%	-58%
G2 (FF = 0.23)	-47%	-16%
G3 (FF = 0.35)	-27%	6%
GA1 (FF = 0.23)	-42%	-35%
GA2 (FF = 0.23)	-46%	-33%

Por último, é necessário avaliar qual o impacto nas necessidades de energia primária das melhores soluções obtidas nas secções anteriores para os níveis de energia mínima e de custo-ótimo das duas análises de sensibilidade efetuadas, face ao valor médio de 175 kWh_{EP}/m².ano obtido para os vários modelos de ER de escritórios analisados nos relatórios facultados pelos EM no âmbito da diretiva europeia.

Na Tabela 5.13 e Tabela 5.14 é notória a diferença obtida tanto em termos de energia mínima como de custo-ótimo com as soluções aplicadas na presente investigação, verificando-se o impacto que as soluções arquitetónicas aplicadas como de componentes apresentam no aumento do desempenho energético dos edifícios como discutido nas secções anteriores.

No conjunto de resultados apresentados evidencia-se a preponderância das questões arquitectónicas dos modelos de edifícios estudados, e como estas afetam o alcance dos níveis ótimos de rentabilidade do desempenho energético, bem como a utilização de soluções mais adaptadas do ponto de vista passivo permite um aumento na exigência das soluções aplicadas nas edificações e no alcance de edifícios de baixas necessidades de energia.

É necessário enfatizar que o conjunto de conclusões apresentadas tanto na presente secção como na secção 5.4 conduzem a uma mera indicação dos níveis de energia mínima e de custo-ótimo, uma vez que a amostra em análise limita a possibilidade de estudo de todas as soluções possíveis tendo em conta a parametrização das variáveis apresentadas na Tabela 5.3 no caso da SA efetuada pelo método de Morris, e o conjunto de modelos de edifícios estudados abrange uma amostra aproximada aos ER apresentados pelos EM no âmbito da diretiva europeia.

Não obstante, as soluções apresentadas permitem satisfazer os requisitos mínimos de conforto térmico dos ocupantes, e são satisfatórias para estabelecer novos limites de eficiência energética e custo-ótimo na tipologia de edifícios de escritórios a nível europeu.

6. Capítulo 6 – Conclusões

No âmbito dos futuros desafios do setor energético europeu, torna-se fulcral uma otimização do setor dos edifícios. Assim a aplicação de um tipo de construção que conduza a um elevado desempenho das edificações, ou seja, a uma minimização das suas necessidades de energia primária, será um elemento de foro principal na evolução do setor.

Na União Europeia a regulamentação apresenta um papel crucial para o alcance de um maior desempenho energético dos edifícios, sendo que os limites regulamentares europeus e nacionais são usualmente estabelecidos com base em estudos de níveis ótimos de rentabilidade dos requisitos mínimos de desempenho energético que utilizam modelos de edifícios de referência, que na presente investigação se considerou não incorporarem as melhores soluções solares passivas ao nível da sua arquitetura para se obterem edifícios de baixo consumo energético.

Na presente dissertação desenvolveu-se um estudo de níveis de energia mínima e de custo-ótimo para avaliação de soluções passivas em edifícios de escritórios, com principal evidência nas características de arquitetura e qualidade térmica da envolvente dos edifícios, dada a menor importância atribuída a estas componentes nos relatórios apresentados pelos Estados-Membros no âmbito da diretiva europeia de regulação do setor. Os edifícios apresentados pelos Estados-Membros evidenciam geometrias essencialmente prismáticas, e pouco adaptadas ao objetivo de edifícios de elevado desempenho energético.

O presente estudo permitiu concluir que o parâmetro da arquitetura mais importante é o fator de forma que apresenta um peso de 80% na variação do desempenho energético, face a outros fatores geométricos e de qualidade térmica da envolvente pela análise de sensibilidade do método de Morris. Igualmente verificou-se que as variáveis de iluminação, equipamentos elétricos e fração de vão envidraçado da envolvente são responsáveis por uma elevada proporção das necessidades de energia primária das construções, correspondendo a cerca de 30%, 50% e 10% do consumo energético dos modelos estudados segundo a análise de sensibilidade detalhada realizada.

A aplicação do método de análise de sensibilidade de Morris permitiu concluir que os níveis mínimos de energia, em Helsínquia correspondem a necessidades de energia primária de 52 kWh_{EP}/m².ano e em Lisboa a 62 kWh_{EP}/m².ano, diferindo em aproximadamente 70% em relação aos resultados verificados nos modelos de edifícios apresentados nos relatórios europeus. No que diz respeito ao nível de custo-ótimo, foi obtido um valor de 182 €/m² para Helsínquia e de 183 €/m² para Lisboa, com necessidades de energia primária de 60 kWh_{EP}/m².ano e 74 kWh_{EP}/m².ano, respetivamente. Os valores de necessidades de energia primária obtidos referem-se a um valor de fator de conversão de energia elétrica em energia primária de 1.7 para a localização de Helsínquia e de 2.5 para Lisboa.

No que diz respeito aos resultados a nível da análise detalhada de sensibilidade efetuada para o modelo de edifício denominado ‘Geometria 2’ que apresenta um fator de forma de 0.23, evidencia-se a preponderância das variáveis de WWR, iluminação e ganhos internos nas necessidades de energia primária do modelo em cerca de 5% a 8%, 10%, e 25% a 35%, respetivamente para cada variável. Em comparação a qualidade térmica da envolvente apresenta uma influência mais determinante no desempenho energético do modelo nas condições climática de Helsínquia, em cerca de 23% por comparação com Lisboa de somente 6%.

A aplicação de estratégias de ventilação passivas, não alteram a importância relativa das variáveis de avaliação do desempenho do edifício, contudo a recorrência a ventilação reduz as necessidades energia para climatização conduzindo a uma redução nas necessidades de energia primária, em média de 10% para as duas localizações. No que diz respeito às diferenças existentes em termos de localização do modelo, é evidente que a aplicação de estratégias solares passivas apresenta um maior sucesso nas condições climáticas de Lisboa, face a Helsínquia. Este resultado permite afirmar que em condições climáticas mais adversas, seja numa situação de exposição a uma dominância de aquecimento, ou de arrefecimento, a obtenção de edifícios de elevado desempenho energético é mais condicionada, em média com um valor superior em 10%.

Esta análise de sensibilidade permitiu concluir que as soluções de energia mínima se obtêm independentemente do tipo de ganhos internos (altos ou baixos), com a aplicação de iluminação LED, de sombreamento externo, uma fração de WWR = 10% e a aplicação de uma estratégia de ventilação natural com um caudal máximo de 2 RPH, resultando numa combinação de solução construtiva de $U_{\text{global}} = 0.14 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ e $U_{\text{vão}} = 1.60 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ na localização de Helsínquia. Por sua vez, a localização de Lisboa necessita de condições semelhantes, diferindo na combinação de solução construtiva que poderá resultar com um $U_{\text{global}} = 0.43 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ e $U_{\text{vão}} = 1.60 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, e a aplicação de uma fração de WWR = 80%.

A nível de valores de necessidades de energia primária obtidos, as soluções com ganhos internos baixos são melhores que os valores atuais obtidos no âmbito dos relatórios nacionais, e nas regulamentações nacionais em vigor, com um valor mínimo de $116 \text{ kWh}_{\text{EP}}/\text{m}^2.\text{ano}$ na localização de Helsínquia e $96 \text{ kWh}_{\text{EP}}/\text{m}^2.\text{ano}$ na localização de Lisboa. Estes resultados traduzem-se numa redução de 40% e 30% respetivamente, em relação aos níveis mínimos nacionais indicados na secção 3.4, e de 35% e 45% respetivamente, em relação aos modelos de edifícios apresentados nos relatórios nacionais no âmbito da diretiva.

Em termos de soluções de custo-ótimo para a análise de sensibilidade detalhada, estas correspondem para a localização de Helsínquia, independentemente do tipo de ganhos internos, a aplicação de iluminação CFL, sombreamento externo, uma fração de WWR = 10% e a aplicação de uma estratégia de ventilação natural com um caudal máximo de 2 RPH, resultando numa combinação de solução construtiva de $U_{\text{global}} = 0.55 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ e $U_{\text{vão}} = 3.30 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Em Lisboa, as soluções identificadas são análogas com uma solução construtiva de $U_{\text{global}} = 0.58 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ e $U_{\text{vão}} = 3.30 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, e uma fração de 10% de WWR. Os resultados de necessidades de energia primária detêm um valor de $144 \text{ kWh}_{\text{EP}}/\text{m}^2.\text{ano}$ e um custo global de 502 €/m^2 em Helsínquia e de $121 \text{ kWh}_{\text{EP}}/\text{m}^2.\text{ano}$ em Lisboa, com um custo global de 497 €/m^2 .

Importa ressaltar que em termos de soluções de custo-ótimo, seria possível obter-se valores menores com a substituição de sombreamento externo por interno, contudo, a combinação de ventilação híbrida com a aplicação de sombreamento interno não foi simulada na análise detalhada do modelo.

Relativamente à análise de sensibilidade efetuada segundo os métodos de regressão e de Morris, é notório que a aplicação de um método de regressão não é o ideal para modelos numéricos de desempenho energético de edifícios com um elevado número de variáveis em estudo e em que estas apresentam correlações entre si, o que não permite o estabelecimento de uma relação de linearidade. Deste modo, a classificação obtida por estes índices não é totalmente satisfatória para responder à questão principal do estudo. A aplicação do método de Morris resultou na opção que permite tanto

avaliar a influência dos parâmetros em estudo, como quantificar a afetação desses pela sua interação com os restantes no modelo do edifício.

Por conseguinte, na análise de sensibilidade por esta via verificou-se que tanto em termos de soluções de energia mínima, como de custo-ótimo, a aplicação de uma estratégia de ventilação natural, com uma variação de 2 RPH ou 5 RPH, é o mais vantajoso. Igualmente, a melhor geometria em termos de forma dita compacta é a que corresponde a um $FF = 0.12$, ou seja, o modelo denominado ‘Geometria 1’. Contudo, comparando o modelo ‘Geometria 2’ (com aplicação de ventilação mecânica) com os modelos do tipo átrio ‘Geometria Átrio 1’ e ‘Geometria Átrio 2’, verifica-se a vantagem do modelo ‘Geometria Átrio 1’, que permite obter menores necessidades de energia primária e de custo-ótimo, corroborando assim a vantagem de uma geometria mais aproximada a solar passiva face a qualquer outra, e sugerindo a sua consideração nos estudos dos níveis ótimos de rentabilidade dos requisitos mínimos de desempenho energético.

Assim sendo, em termos de soluções de energia mínima, obtém-se como melhor solução o modelo ‘Geometria 1’, com um valor de necessidades de energia primária de $52 \text{ kWh}_{EP}/\text{m}^2\cdot\text{ano}$, uma fração de $WWR = 10\%$, $U_{\text{global}} = 0.14 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ e $U_{\text{vão}} = 1.60 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, com a aplicação de iluminação LED, ganhos Internos = $24.3 \text{ W}/\text{m}^2$ ($7.5 \text{ m}^2/\text{pessoa} + 7.5 \text{ W}/\text{m}^2$), sombreamento interno e ventilação natural (2 RPH) na localização de Helsínquia. Em Lisboa verifica-se que a melhor solução é obtida com o mesmo modelo de construção, com um valor de necessidades de energia de $62 \text{ kWh}_{EP}/\text{m}^2\text{K}$, uma fração de $WWR = 80\%$, $U_{\text{global}} = 0.18 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ e $U_{\text{vão}} = 2.80 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, com aplicação de iluminação LED, ganhos internos = $24.3 \text{ W}/\text{m}^2$ ($7.5 \text{ m}^2/\text{pessoa} + 7.5 \text{ W}/\text{m}^2$), sombreamento externo e ventilação natural (5 RPH).

As soluções de custo-ótimo correspondem para Helsínquia a um custo global de 182 €/m^2 com um valor de necessidades de energia primária de $60 \text{ kWh}_{EP}/\text{m}^2\text{K}$, uma fração de $WWR = 10\%$, $U_{\text{global}} = 0.14 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ e $U_{\text{vão}} = 2.80 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, com a aplicação de iluminação CFL, ganhos internos = $16 \text{ W}/\text{m}^2$ ($15 \text{ m}^2/\text{pessoa} + 7.5 \text{ W}/\text{m}^2$), sombreamento interno e ventilação natural (2 RPH). Em Lisboa, a combinação de solução de componentes é igual, diferindo na fração de WWR que é neste caso de 80%, obtendo um valor de custo global de 183 €/m^2 com um valor de necessidades de energia primária associado de $74 \text{ kWh}_{EP}/\text{m}^2\cdot\text{ano}$.

Deste modo, é possível afirmar que mesmo com a existência de limitações em termos de computação que uma simulação do tipo paramétrica apresenta, na necessidade de utilização de um elevado número de modelos numéricos, pode-se afirmar que esta via é a mais satisfatória no acesso aos níveis ótimos de rentabilidade de medidas de eficiência energética. A aplicação deste tipo de simulação permite abranger o conjunto total de soluções existente para a totalidade de parâmetros definidos pelo utilizados, bem como, a obtenção das combinações dos vários componentes em estudo mais próximo do praticado a nível de construção de edifícios.

Não obstante, em termos de aplicação de métodos de SA, o método de Morris permite uma análise mais rápida e acertiva com os resultados obtidos por parte da simulação paramétrica, em termos de influência das variáveis no desempenho energético da construção. Assim sendo pode-se corroborar que esta é uma via aceitável para efetuar o tipo de estudo efetuado na presente dissertação. Igualmente, a aplicação deste método permitiu identificar soluções de energia mínima e custo-ótimo dos vários modelos, e assim, quantificar a influência que os tipos de arquitetura e envolvente apresentam nesta tipologia de edifícios a nível europeu.

Refletindo sobre os edifícios de elevado desempenho energético, e sobre o objetivo de edifício nZEB patente na diretiva europeia e na amostra de edifícios de elevado desempenho energético no Capítulo 2 que serve de permissa à realização deste estudo, pode-se afirmar que a arquitetura da construção, bem como o tipo de soluções passivas aplicadas, afeta de forma preponderante o alcance de edifícios com um elevado desempenho energético.

Assim, preconiza-se que o modelo de edifícios de escritórios europeu corresponda a um modelo com um fator de forma igual ou inferior a 0.20, um valor de um valor de fração de vão envidraçada (WWR) de 10% em Helsínquia e 80% em Lisboa e uma minimização dos valores de coeficientes de transferência de calor da envolvente opaca e envidraçada e das componentes de ganhos internos (iluminação, equipamentos elétricos e ocupação). Estes modelos deverão sempre que possível adotar uma estratégia arquitetónica solar passiva (como os espaços de átrio analisados no presente estudo) combinado com o dimensionamento de espaços de trabalho pouco profundos. É ainda fulcral a adoção de sistemas de controlo de iluminação natural, dispositivos de sombreamento, uma estratégia de ventilação natural e sistemas energéticos de climatização de elevada eficiência.

Por último, os possíveis desenvolvimentos futuros deste estudo prendem-se com o avançar da caracterização dos sistemas energéticos e perfis de operação das construções, podendo-se assim caracterizar todas as componentes da tipologia de edifícios de escritórios que permitem obter um edifício de elevado desempenho energético. No âmbito das questões de arquitetura e envolvente, os desenvolvimentos seguintes seriam a parametrização das dimensões do edifício, para obtenção das relações dimensionais que permitem obter os níveis de energia mínima e custo-ótimo, que abranja a totalidade do parque de edificado europeu, e noutra vertente, a aplicação de outros métodos de análise de sensibilidade em estudos de níveis ótimos de rentabilidade dos requisitos mínimos de desempenho energético.

Referências Bibliográficas

- [1] European Environment Agency, “Final energy consumption by sector and fuel,” 2017. [Online]. Disponível: <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/final-energy-consumption-by-sector-9/assessment-1>. [Acedido: 14-Ago-2017].
- [2] European Commission, “Paris Agreement,” 2017. [Online]. Disponível: https://ec.europa.eu/clima/policies/international/negotiations/paris_en. [Acedido: 14-Ago-2017].
- [3] United Nations Framework Convention on Climate Change, “Kyoto Protocol,” 2014. [Online]. Disponível: http://unfccc.int/kyoto_protocol/items/2830.php. [Acedido: 14-Ago-2017].
- [4] Parlamento Europeu e Conselho da União Europeia, “Directiva 2010/31/UE do Parlamento Europeu e do Conselho de 19 de Maio de 2010 relativa ao desempenho energético dos edifícios (reformulação),” *J. Of. da União Eur. PT L*, pp. 13–35, 2010.
- [5] N. Lechner, – *Heating, Cooling, Lighting: Design Methods for Architects*, 4th ed. Wiley, 2014.
- [6] E. Naboni, A. Malcangi, Y. Zhang, and F. Barzon, “Defining the energy saving potential of architectural design,” *Energy Procedia*, vol. 83, no. 1991, pp. 140–146, 2015.
- [7] N. Griffiths and I. Nolte, *Principles For neARly Zero-energy Buildings*. 2011.
- [8] European Commission, “National reports on energy performance requirements,” *Buildings*, 2013. [Online]. Disponível: <https://ec.europa.eu/energy/en/topics/energy-efficiency/buildings>. [Acedido: 14-Ago-2017].
- [9] U.S. Department of Energy’s (DOE), “EnergyPlus.” [Online]. Disponível: <https://energyplus.net/>. [Acedido: 14-Ago-2017].
- [10] JEPlus, “JEPlus – An EnergyPlus simulation manager for parametrics,” 2016. [Online]. Disponível: <http://www.jeplus.org/wiki/doku.php>. [Acedido: 14-Ago-2017].
- [11] European Commission, “SIMLAB and other software,” *The European Commission’s science and knowledge service*, 2016. [Online]. Disponível: <https://ec.europa.eu/jrc/en/samo/simlab>. [Acedido: 14-Ago-2017].
- [12] Parlamento Europeu e Conselho da União Europeia, “Directiva 2002/91/EC do Parlamento Europeu e do Conselho de 16 de Janeiro de 2002 relativa ao desempenho energético de edifícios,” *J. Of. da União Eur. PT L*, pp. 65–71, 2002.
- [13] M. A. de Andrade, “Parametrização das necessidades de energia para aquecimento e arrefecimento como suporte a estudos de custo-benefício,” Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, 2015.
- [14] Comissão Europeia, “Regulamento Delegado (UE) N. o 244/2012 da Comissão de 16 de janeiro de 2012 que complementa a Diretiva 2010/31/UE do Parlamento Europeu e do Conselho relativa ao desempenho energético dos edifícios,” *J. Of. da União Eur. PT L*, pp. 18–36, 2012.
- [15] A. Brandão De Vasconcelos, M. D. Pinheiro, A. Manso, and A. Cabaço, “EPBD cost-optimal methodology: Application to the thermal rehabilitation of the building envelope of a Portuguese residential reference building,” *Energy Build.*, vol. 111, pp. 12–25, 2016.
- [16] R. C. Karsten Voss, Igor Santori, “Nearly-zero, Net zero and Plus Energy Buildings – How definitions & regulations affect the solutions,” *REHVA J.*, pp. 23–27, 2012.
- [17] V. K. Torben V. Esbensen, “Performance of the Zero Energy House in Denmark,” *Tech. Univ. Denmark*, pp. 1–14, 1977.
- [18] P. Torcellini, S. Pless, M. Deru, and D. Crawley, “Zero Energy Buildings: A Critical Look at the Definition,” *ACEEE Summer Study Pacific Grove*, p. 15, 2006.
- [19] M. J. N. O. Panão, “The overall renewable energy fraction: An alternative performance indicator for evaluating Net Zero Energy Buildings,” *Energy Build.*, vol. 127, pp. 736–747, 2016.
- [20] M. Panagiotidou and R. J. Fuller, “Progress in ZEBs-A review of definitions, policies and construction activity,” *Energy Policy*, vol. 62, pp. 196–206, 2013.
- [21] A. J. Marszal *et al.*, “Zero Energy Building - A review of definitions and calculation methodologies,” *Energy Build.*, vol. 43, no. 4, pp. 971–979, 2011.
- [22] A. S. François Garde, Daniel Aelenei, Josef Ayoub, Laura Aelenei, *Solution Sets for Net Zero Energy Buildings - Feedback from 30 Net ZEBs worldwide*. Ernst & Sohn, 2017.

- [23] S. P. Corgnati, E. Fabrizio, M. Filippi, and V. Monetti, “Reference buildings for cost optimal analysis: Method of definition and application,” *Appl. Energy*, vol. 102, pp. 983–993, 2013.
- [24] T. Loga, N. Diefenbach, E. G. Dascalaki, and C. Balaras, *Use of Building Typologies for Energy Performance Assessment of National Building Stocks. Existent Experiences in European Countries and Common Approach: First TABULA Synthesis Report*, no. June 2009. 2010.
- [25] A. Brandão de Vasconcelos, M. D. Pinheiro, A. Manso, and A. Cabaço, “A Portuguese approach to define reference buildings for cost-optimal methodologies,” *Appl. Energy*, vol. 140, no. January 2012, pp. 316–328, 2015.
- [26] C. Baglivo, P. M. Congedo, D. D’Agostino, and I. Zacà, “Cost-optimal analysis and technical comparison between standard and high efficient mono-residential buildings in a warm climate,” *Energy*, vol. 83, pp. 560–575, 2015.
- [27] P. O. Fanger, *Thermal comfort. Analysis and applications in environmental engineering*. 1970.
- [28] D. P. D. Theodore L. Bergman, Adrienne S. Lavine, Frank P. Incropera, *Fundamental of Mass and Heat Transfer*, 7th ed. John Wiley & Sons, 2011.
- [29] M. J. N. O. Panão, “Transferência de Calor e Balanço de Energia em Edifícios.” 2015.
- [30] G. Carrilho Da Graça, “Conservação de Energia num compartimento.” p. 19, 2011.
- [31] I. Autodesk, “Building Performance Analysis,” 2013. [Online]. Disponível: <https://gbs.autodesk.com/GBS/>. [Acedido: 14-Ago-2017].
- [32] Office of Energy Efficiency & Renewable Energy Forrestal Building, “Passive Solar Home Design,” 2017. [Online]. Disponível: <https://energy.gov/energysaver/passive-solar-home-design>. [Acedido: 14-Ago-2017].
- [33] R. V. Ralegaonkar and R. Gupta, “Review of intelligent building construction: A passive solar architecture approach,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 14, no. 8, pp. 2238–2242, 2010.
- [34] B. Givoni, “Performance and applicability of passive and low-energy cooling systems,” *Energy Build.*, vol. 17, pp. 177–199, 1991.
- [35] M. G. L. Marques, “Impacts of varying building geometries, materials and technologies on the performance of buildings,” Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, 2016.
- [36] conceito.de, “Conceito de altitude,” 2014. [Online]. Disponível: <http://conceito.de/altitude>. [Acedido: 14-Ago-2017].
- [37] P. H. G. Cabral, “Despacho (extrato) n.º 15793-F/2013,” *Diário da República*, vol. 234, p. 29, 2013.
- [38] Finnish Meteorological Institute, “Heating Degree Days,” 2017. [Online]. Disponível: http://en.ilmatieteenlaitos.fi/heating-degree-days?p_auth=j9Aww17W&p_p_id=WebProxyPortlet_WAR_WebProxyPortlet_INSTANCE_8Jem&p_p_lifecycle=1&p_p_state=normal&p_p_mode=view&p_p_col_id=column-2&p_p_col_count=3&_WebProxyPortlet_WAR_WebProxyPortlet_INSTANCE_8Jem_edu.wisc.my.webproxy.URL=http%3A%2F%2Fcdn.fmi.fi%2Flegacy-fmi-fi-content%2Fproducts%2Fheating-degree-days%2Findex.php. [Acedido: 14-Ago-2017].
- [39] M. C. Brito, “Órbita do Sol.” 2014.
- [40] C. McGee, “Orientation,” *Your Home*, 2013. [Online]. Disponível: <http://www.yourhome.gov.au/passive-design/orientation>. [Acedido: 14-Ago-2017].
- [41] R. Pacheco, J. Ordóñez, and G. Martínez, “Energy efficient design of building: A review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 16, no. 6, pp. 3559–3573, 2012.
- [42] E. Gratia and A. De Herde, “Design of low energy office buildings,” *Energy Build.*, vol. 35, no. 5, pp. 473–491, 2003.
- [43] F. Goia, “Search for the optimal window-to-wall ratio in office buildings in different European climates and the implications on total energy saving potential,” *Sol. Energy*, vol. 132, pp. 467–492, 2016.
- [44] E. e S. S. Ministério do Ambiente, Ordenamento do Território, Energia e da Solidariedade, “Portaria n.º 349-D/2013,” *Diário da República*, pp. 40–73, 2013.
- [45] Ministry of the Environment, “National Building Code of Finland,” *L. Use Build. Act*, pp. 1–27, 2003.
- [46] Dnp-screens.com, “Illuminance is the amount of light energy reaching a given point on a surface area,” 2017. [Online]. Disponível: <http://www.dnp-screens.com/DNP08/Technology/Basic->

- Visual/What-is-light/Illuminance.aspx. [Acedido: 22-Fev-2017].
- [47] S. Schiavoni, F. D. Alessandro, F. Bianchi, and F. Asdrubali, “Insulation materials for the building sector : A review and comparative analysis,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 62, pp. 988–1011, 2016.
- [48] A. Pinto, “Estudo sobre cálculo dos níveis óptimos de rentabilidade dos requisitos mínimos de desempenho energético dos edifícios e componentes de edifícios - Contribuições para o estudo dos edifícios de escritórios: Construção nova,” 2014.
- [49] Comissão Europeia, “Regulamento (UE) N. o 206/2012 da comissão de 6 de março de 2012 que dá execução à Diretiva 2009/125/CE do Parlamento Europeu e do Conselho no que respeita aos requisitos de conceção ecológica para aparelhos de ar condicionado e ventiladores,” vol. 2012, no. 8, pp. 7–27, 2012.
- [50] A. L. Gordon Sutherland, Pau Garcia Audi, *Implementing the Energy Performances of buildings directive (EPBD) - 2016*. Intelligent Energy – Europe Programme of the European Union, 2016.
- [51] M. P. Rebelo, “Contributo para a definição de edifício com necessidades quase nulas de energia para aquecimento e arrefecimento : edifícios de habitação,” Universidade de Lisboa - Faculdade de Ciências, 2012.
- [52] P. Heiselberg, H. Brohus, A. Hesselholt, H. Rasmussen, E. Seinre, and S. Thomas, “Application of sensitivity analysis in design of sustainable buildings,” *Renew. Energy*, vol. 34, no. 9, pp. 2030–2036, 2009.
- [53] W. Tian, “A review of sensitivity analysis methods in building energy analysis,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 20, pp. 411–419, 2013.
- [54] M. H. Kristensen and S. Petersen, “Choosing the appropriate sensitivity analysis method for building energy model-based investigations,” *Energy Build.*, vol. 130, pp. 166–176, 2016.
- [55] B. Eisenhower *et al.*, “Uncertainty and sensitivity decomposition of building energy models,” vol. 1493, no. July, 2017.
- [56] J. D. Spitler, D. E. Fisher, and D. C. Zietlow, “A Primer on the Use of Coefficients in Building Simulation Approaches,” in *Building Performance Simulation Association (IBPSA) conference*, 1989, no. 1, pp. 299–304.
- [57] A.-T. Nguyen and S. Reiter, “A performance comparison of sensitivity analysis methods for building energy models,” *Build. Simul.*, vol. 8, no. 6, pp. 651–664, 2015.
- [58] A.-T. Nguyen, “Sustainable Housing in Vietnam: Climate responsive design strategies,” Universite de Liege, 2013.
- [59] A. C.-A. Fernando Domínguez-Muñoz, José M. Cejudo-López, “Uncertainty in peak cooling load calculations,” *Energy an*, vol. 42, pp. 1010–1018, 2010.
- [60] J. S. Hygh, J. F. DeCarolis, D. B. Hill, and S. Ranji Ranjithan, “Multivariate regression as an energy assessment tool in early building design,” *Build. Environ.*, vol. 57, pp. 165–175, 2012.
- [61] I. Ballarini and V. Corrado, “Analysis of the building energy balance to investigate the effect of thermal insulation in summer conditions,” *Energy Build.*, vol. 52, pp. 168–180, 2012.
- [62] H. Breesch and A. Janssens, “Performance evaluation of passive cooling in office buildings based on uncertainty and sensitivity analysis,” *Sol. Energy*, vol. 84, no. 8, pp. 1453–1467, 2010.
- [63] Y. Yildiz, K. Korkmaz, T. Göksal özbalta, and Z. Durmus Arsan, “An approach for developing sensitive design parameter guidelines to reduce the energy requirements of low-rise apartment buildings,” *Appl. Energy*, vol. 93, pp. 337–347, 2012.
- [64] P. De Wilde and W. Tian, “Management of thermal performance risks in buildings subject to climate change,” *Build. Environ.*, vol. 55, pp. 167–177, 2012.
- [65] M. D. Morris, “Factorial Sampling Plans for Preliminary Computational Experiments,” *Technometrics*, vol. 33, pp. 161–174, 1991.
- [66] K. Menberg, Y. Heo, and R. Choudhary, “Sensitivity analysis methods for building energy models: Comparing computational costs and extractable information,” *Energy Build.*, vol. 133, pp. 433–445, 2016.
- [67] D. Garcia Sanchez, B. Lacarrière, M. Musy, and B. Bourges, “Application of sensitivity analysis in building energy simulations: Combining first- and second-order elementary effects methods,” *Energy Build.*, vol. 68, no. PART C, pp. 741–750, 2014.
- [68] M. Mohsenin and J. Hu, “Assessing daylight performance in atrium buildings by using Climate







- Based Daylight Modeling,” *Sol. Energy*, vol. 119, pp. 553–560, 2015.
- [69] A. Saltelli, M. Ratto, S. Tarantola, and F. Campolongo, *Sensitivity analysis practice: A guide to scientific models*, vol. 91, no. 10–11. 2006.
- [70] H. E. M. Vincenzo Corrado, “Uncertainty and Sensitivity Analysis for Building Energy Rating,” *J. Build. Phys.*, vol. 33, no. 2, pp. 125–156, 2009.
- [71] F. Goia, M. Haase, and M. Perino, “Optimizing the configuration of a facade module for office buildings by means of integrated thermal and lighting simulations in a total energy perspective,” *Appl. Energy*, vol. 108, pp. 515–527, 2013.
- [72] H. E. Mechri, A. Capozzoli, and V. Corrado, “USE of the ANOVA approach for sensitive building energy design,” *Appl. Energy*, vol. 87, no. 10, pp. 3073–3083, 2010.
- [73] H. Shen and A. Tzempelikos, “Sensitivity analysis on daylighting and energy performance of perimeter of offices with automated shading,” *Build. Environ.*, vol. 59, pp. 303–314, 2013.
- [74] C. B. Storlie, L. P. Swiler, J. C. Helton, and C. J. Sallaberry, “Implementation and Evaluation of Nonparametric Regression Procedures for Sensitivity Analysis of Computationally Demanding Models,” no. Dezembro, 2008.
- [75] J. F. Trevor Hastie, Robert Tibshirani, *The Elements of Statistical Learning - Data Mining, Inference, and Prediction*. Springer, 2009.
- [76] P. De Wilde and W. Tian, “Predicting the performance of an office under climate change: A study of metrics, sensitivity and zonal resolution,” *Energy Build.*, vol. 42, no. 10, pp. 1674–1684, 2010.
- [77] P. de Wilde and W. Tian, “Identification of key factors for uncertainty in the prediction of the thermal performance of an office building under climate change,” *Build. Simul.*, vol. 2, no. 3, pp. 157–174, 2009.
- [78] N. Ganiç and A. Z. Yılmaz, “Adaptation of the cost optimal level calculation method of Directive 2010/31/EU considering the influence of Turkish national factors,” *Appl. Energy*, vol. 123, pp. 94–107, Jun. 2014.
- [79] T. L. Hemsath and K. Alagheband Bandhosseini, “Sensitivity analysis evaluating basic building geometry’s effect on energy use,” *Renew. Energy*, vol. 76, pp. 526–538, 2015.
- [80] C. Dai, L. Lan, and Z. Lian, “Method for the determination of optimal work environment in office buildings considering energy consumption and human performance,” *Energy Build.*, vol. 76, pp. 278–283, Jun. 2014.
- [81] S. J. R. Sherif Ezzeldin, “The potential for office buildings with mixed-mode ventilation and low energy coolings systems in arid climates,” *Energy Build.*, vol. 65, pp. 368–381, 2013.
- [82] K. S. Mohamed Hamdy, Ala Hasan, “A multi-stage optimization method for cost-optimal and nearly-zero-energy building solutions in line with EPBD-recast 2010,” *Energy Build.*, vol. 56, pp. 189–203, 2013.
- [83] E. Pikas, M. Thalfeldt, and J. Kurnitski, “Cost optimal and nearly zero energy building solutions for office buildings,” *Energy Build.*, vol. 74, pp. 30–42, Mai 2014.
- [84] O. S. G. Rapone, “Optimisation of curtain wall façades for office buildings by means of PSO algorithm,” *Energy Build.*, vol. 45, pp. 189–196, 2011.
- [85] A. Aldawoud, “The influence of the atrium geometry on the building energy performance,” *Energy Build.*, vol. 57, pp. 1–5, 2013.
- [86] A. Boyano, P. Hernandez, and O. Wolf, “Energy demands and potential savings in European office buildings: Case studies based on EnergyPlus simulations,” *Energy Build.*, vol. 65, pp. 19–28, 2013.
- [87] T. Tabesh and B. Sertyesilisik, “Focus on Atrium Spaces Aspects on the Energy Performance,” pp. 54–59, 2015.
- [88] J. Du and S. Sharples, “Daylight in atrium buildings: Geometric shape and vertical sky components,” *Light. Res. Technol.*, vol. 42, no. 4, pp. 385–397, 2010.
- [89] J. J. Hirsch, “Building Energy Use and Cost Analysis Software - DOE2,” 2016. [Online]. Disponível: <http://www.doe2.com/>. [Acedido: 14-Ago-2016].
- [90] W. Y. Hung and H. Kong, “Architectural aspects of atrium,” *Int. J. Eng. Performance-Based Fire Codes*, vol. 5, no. 4, pp. 131–137, 2003.
- [91] E. R. G. University College Dublin, “Daylighting in Buildings.” p. 32, 1994.

- [92] Trimble, “SketchUp,” 2017. [Online]. Disponível: <https://www.sketchup.com/>. [Acedido: 26-Ago-2017].
- [93] Google, “GoogleEarth,” 2017. [Online]. Disponível: <https://www.google.com/earth/>. [Acedido: 14-Ago-2017].
- [94] F. R. Markus Kottek, Jurgen Grieser, Christoph Beck, Bruno Rudolf, “World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated,” *Meteorol. Zeitschrift*, vol. 15, no. 3, pp. 259–263, 2006.
- [95] V. H. de O. Clérigo, “Ventilação Mista em Edifícios de Habitação,” Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, 2014.
- [96] O. do T. e E. Ministérios do Ambiente and E. e S. S. da Saúde e da Solidariedade, “Portaria n.º 353A/2013,” *Diário da República*, vol. 235, pp. 2–9, 2013.
- [97] T. e T. Ministério das Obras Públicas, “Decreto-Lei n.º 79/2006,” *Diário da República*, vol. 67, pp. 2416–2468, 2006.
- [98] Office of Energy Efficiency & Renewable Energy, “Lighting Basics.” [Online]. Disponível: <https://energy.gov/eere/energybasics/articles/lighting-basics>. [Acedido: 25-Ago-2017].
- [99] Office of Energy Efficiency & Renewable Energy, “Buildings Energy Data Book.” 2011.
- [100] E. G. Arthur Santos Silva, “Análise de sensibilidade global dos parâmetros termofísicos de uma edificação residencial de acordo com o método de simulação do RTQ-R,” *Ambient. Construído*, vol. 13, no. 4, pp. 135–148, 2013.
- [101] European Commission - IPCS, “SIMLAB 2.2 - Reference Manual.” 2008.
- [102] CYPE - Software para Engenharia e Construção, “Gerador de preços,” 2017. [Online]. Disponível: <http://geradordeprecos.cype.pt/>. [Acedido: 20-Jun-2017].
- [103] Eurostat, “Energy price statistics,” 2017. [Online]. Disponível: http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Energy_price_statistics.
- [104] EDP, “Sabe quanto CO2 emite?,” 2017. [Online]. Disponível: <https://energia.edp.pt/particulares/apoio-cliente/simulador-co2/>. [Acedido: 26-Ago-2017].

A. Anexos

Anexo A – Síntese dos edifícios de elevado desempenho energético

Tabela A.1: Dados construtivos e energéticos dos edifícios de elevado desempenho energético [22].

Construção											Energia Produzida e Consumo Elétrico						FC	
Dados da construção											Procura de Energia [kWh/m ² .ano]		Biocombustível/ Gás Natural		Consumo de Energia [kWh/m ² .ano]			
											Eletricidade		FER					
Edifício	Data	Localização	Clima	Área útil de pavimento [m ²]	Área condicionada [m ²]	Ocupação [m ² /pessoa]	Custo [€/m ²]	NºPisos	FF [m ⁻¹]	Compactacidade [m ³ /m ²]	Final	Primária	Final	Primária	Final	Primária		
	Ilet do Centre	2008	França	Arrefecimento	310	11.6	15.5	2121				66	219			92	304	3.3
	Elithis Tower	2009	França	Aquecimento e Arrefecimento	4567	4500	14.3	1693	9	0.18	5.6	38	11	99	7	17	17	1.0
	Green Office	2011	França	Aquecimento/ Arrefecimento	21807	21500	14.3	1937	5 a 7	0.53	1.9	38	97	43	13	20	51	2.6
	Solar XXI	2006	Portugal	Arrefecimento	1500	1200	62.5	800	2	0.39	2.6	24	60			25	63	2.5
	CIRCE Zaragoza	2010	Espanha	Arrefecimento	1743	1700	9.0		2	0.56	1.8	87	67	20	21	5	12	2.3
	Marché Kempthal	2007	Suíça	Aquecimento e Arrefecimento	1267	1550	31.0		3	1.05	1.0	379	78			32	63	2.0

Edifícios de escritórios de baixas necessidades de energia –
Contributo da arquitetura e soluções passivas para soluções de custo-ótimo

Tabela A.2: Síntese das soluções arquitetónicas e de eficiência energética dos edifícios analisados na Tabela A.1 [22].

Dados da construção				Medidas Passivas								Estratégias Passivas	
				Construção				Estratégias Passivas					
Edifício	Data	Localização	Opções de arquitetura e estratégias de eficiência energética passivas	Paredes Exteriores		Cobertura		Pavimento (Solo)	Janelas			Aquecimento	Arrefecimento
				U [W/m².K] e α	Constituição	U [W/m².K] e α	Constituição	U [W/m².K]	U [W/m².K] e g	Constituição	WWR		
Ilet do Centre	2008	França	Este edifício apresenta sombreamento, estratégias de arrefecimento noturno e instalação doméstica de águas quentes. Apresenta vias de circulação exteriores distanciadas das fachadas de modo a providenciar privacidade nos espaços de trabalho.	3.79; 0.97	Madeira de pele dupla em 4.8m da fachada + vegetação viva + 16cm de muro de betão	0		3.40	0.87		70% - Sul; 20% - Norte		Ventilação Natural; Cobertura/Fachada Verde; Sombreamento; Sistemas de controlo de iluminação natural
Elithis Tower	2009	França	O objetivo deste projeto foi a combinação de estética, integração urbana, conforto do utilizador, desempenho energético e ambiental e preço. A sua envolvente é constituída por uma estrutura de betão revestida por madeira e isolamento reciclável (celulose). Os seus vãos envidraçados correspondem a cerca de 75% das fachadas, e de modo a potenciar a luz natural, evitando encandeamento e reduzindo ganhos solares apresenta um sombreamento especial. Esta torre detém uma forma redonda muito compacta, reduzindo a área de envolvente (menos 10% que num escritório convencional), que possibilita um efeito positivo nas perdas de calor, ganhos solares e exposição ao vento.	0.32	Betão/ Aço/ Vidro/Madeira/Isolamento reciclável (celulose)	0.22	Betão + Isolamento	0.39	1.10; 0.40	Vidro duplo de baixa emissividade (8/20/6)	70% - Todas as direções	Compactacidade; "Open space"; Recuperação de calor	Sombreamento; Arrefecimento Noturno; Arrefecimento evaporativo;
Green Office	2011	França	Este edifício segue o conceito Passivhaus, com um elevado isolamento térmico das suas paredes exteriores e fachadas envidraçadas. A fachada Sul bastante envidraçada permite bastante iluminação natural nos espaços interiores, e o sombreamento veneziano protege do encandeamento provocado pela luz solar.	0.14; 0.40	Parede exterior de betão com 20 cm de lâ mineral (2 camadas). Isolamento/ Proteção solar com células PV/ Tela de sombra externa	0.16; 0.30	Aço	0.20	1.50; 0.67		40% - N; 5% - O; 20% - S; 20% - E	Inércia térmica	Ventilação Natural; Cobertura/Fachada Verde; Sombreamento; Sistemas de controlo de iluminação natural
Solar XXI	2006	Portugal	O design do edifício SOLAR XXI é baseado numa combinação de técnicas de design passivas com tecnologias de energia renovável, incluindo PV e coletores solares. Uma extensa superfície envidraçada na fachada sul permite que haja iluminação natural nos espaços interiores, com sombreamento veneziano. Um dos grandes objetivos deste design, localização, orientação e tamanho da área envidraçada foi permitir um aumento dos ganhos solares no Inverno. Em adição, o sistema PV colocado na fachada Sul contribui para um ambiente interior mais frio, mesmo quando o calor é libertado dos painéis fotovoltaicos no processo de conversão de radiação solar em energia.	0.45	Alvenaria de tijolo de 22cm; Isolado externamente com XPS 6cm	0.26	Isolado externamente com XPS 10cm	0.80	3.50; 0.75	Vidro duplo transparente	5% - N; 10% - O; 25% - S; 10% - E	Recuperação de Calor; Inércia térmica; Ganhos solares;	Ventilação Natural; Sombreamento; Arrefecimento pelo solo; Sistemas de controlo de iluminação natural;
CIRCE Zaragoza	2010	Espanha	Este edifício de dois pisos, detém uma forma compacta. Os três elementos principais são: um núcleo redondo coberto por uma clarabóia, espaços de escritórios em volta do núcleo, e um corpo retangular para laboratórios que protege da exposição ao vento.	0.67; 0.43	Int - Ext: Gesso cartonado; Tijolo oco; Espaço de ar; Isolamento de fibra de vidro (3cm); Camada de betão; tijolo de argila leve	0.25; 0.30	Cobertura verde	0.48	1.10; 0.40	Vidro duplo de baixa emissividade (4/15/4)	5% - N; 5% - O; 10% - S; 10% - E;	"Open Space"; Inércia térmica	Ventilação Natural; Sombreamento; Cobertura/ Fachada Verde; Sistemas de controlo de iluminação natural
Marché Kempthal	2007	Suíça	Este edifício apresenta uma envolvente bastante isolada. O seu design inclui grandes vãos envidraçados à Sul, e varadas que permitem sombreamento.	0.12	18mm madeira; 30mm ar; 15mm kronotec; 340mm lâ mineral;	0.09	Construção de madeira	0.11	0.73; 0.49;	Vidro triplo	15% - N; 10% - O; 80% - S; 5% - E;	Inércia térmica;	Sistemas de controlo de iluminação natural;

Anexo B – Custo global dos componentes dos edifícios

Tabela A.3: Soluções construtivas das superfícies opacas aplicadas aos modelos de edifícios em estudo.

Superfície	Material	e [mm]	e [m]	λ [W/mK]	c [kJ/kgK]	ρ [kg/m ³]
Parede Exterior	Reboco	30	0.03	0.80	1.0	1600
	Tijolo	220	0.22	0.43	0.8	1200
	EPS			0.04	1.3	25
	Reboco	30	0.03	0.80	1.0	1600
Cobertura	Telha de cerâmica	10	0.01	1.00	0.8	2300
	Cimento	40	0.04	0.90	0.9	1800
	Betonilha	50	0.05	1.49	0.9	2200
	XPS			0.04	1.3	35
	Protetor de humidade	2	0.002	0.23	0.2	1200
	Areia e gravilha	40	0.04	1.16	1.0	200
	Tijolo	180	0.18	0.66	0.8	1200
	Reboco	10	0.01	0.80	1.0	1600
Pavimento Exterior	Telha	10	0.01	1.00	0.8	2300
	CI	60	0.06	0.22	1.0	500
	XPS			0.04	1.3	25
	Pavimento	260	0.26	0.67	0.8	842
	Reboco	20	0.02	0.70	1.0	1400
Pavimento Interior	Reboco	40	0.04	0.70	1.0	1400
Parede Exterior	Reboco	15	0.015	0.18	1.5	900
	Tijolo	4	0.04	0.66	0.8	1200
	Reboco	15	0.015	0.18	1.5	900

Tabela A.4: Custo económico das superfícies da envolvente opaca consideradas no presente estudo [102].

Parede Exterior				Cobertura				Pavimento			
XPS (Variação do custo de XPS)		Custo de Investimento - Solução Construtiva	Custo de Manutenção (10 anos)	EPS (Variação do custo de EPS)		Custo de Investimento - Solução Construtiva	Custo de Manutenção (10 anos)	XPS (Variação do custo de XPS)		Custo de Investimento - Solução Construtiva	Custo de Manutenção (10 anos)
cm	€/m ²	€/m ²	€/m ²	cm	€/m ²	€/m ²	€/m ²	cm	€/m ²	€/m ²	€/m ²
0	0.0	53.1	5.8	0	0.0	1.8	0.0	0	0.0	7.1	0.0
2	3.4	56.5	6.2	2	2.7	4.5	0.1	10	11.1	18.2	0.0
4	6.8	60.8	6.7	4	5.4	9.0	0.2	20	27.0	36.4	0.0
7	11.9	67.6	7.5	7	9.5	13.3	0.3				
10	17.0	75.7	8.4	10	13.6	17.7	0.4				
15	25.5	91.7	10.2	15	20.4	26.5	0.5				
20	34.0	107.2	11.9	20	27.2	35.4	0.7				
25	42.4	134.0	14.7	25	34.0	44.2	0.9				
30	50.9	160.8	17.7	30	40.7	53.0	1.1				
35	59.4	187.6	20.6	35	47.5	61.9	1.2				

Edifícios de escritórios de baixas necessidades de energia –
Contributo da arquitetura e soluções passivas para soluções de custo-ótimo

Tabela A.5: Custo económico das soluções construtivas de vãos envidraçados aplicado para obtenção das soluções apresentadas na secção 5.4 [102].

Vãos envidraçados				Custo de Investimento	Custo de Manutenção (10 anos)	Descrição da solução construtiva (Espessura Vidro Ext Ar Vidro Int - Tipo de vão envidraçado - Tipo de gás aplicado)
U [W/(m²K)]	g	τ	€/m²	€/m²	€/m²	
1.6	0.26	0.43	95.3	113.2	23.8	6 12 6 - Controlo Solar + Baixa Emissividade Incolor - Ar
	0.14	0.12	139.1	158.0	33.2	6 12 6 - Controlo Solar + Baixa Emissividade Cinzento - Ar
	0.29	0.34	139.1	158.0	33.2	6 12 6 - Controlo Solar + Baixa Emissividade Azul - Ar
2.8	0.59	0.61	84.6	102.2	21.5	6 12 6 - Vidro Controlo Solar Incolor - Ar
	0.40	0.36	116.4	134.8	28.3	6 12 6 - Vidro Controlo Solar Cinzento - Ar
	0.47	0.45	128.4	147.1	30.9	6 12 6 - Vidro Controlo Solar Azul - Ar
3.3	0.87	0.81	22.0	37.9	8.0	4 6 4 - Vidro Standard Incolor - Ar

Tabela A.6: Custo económico das soluções construtivas de vãos envidraçados aplicado para obtenção das soluções apresentadas na secção 5.5 [102].

Vãos envidraçados				Custo de Investimento	Custo de Manutenção (10 anos)	Descrição da solução construtiva (Espessura Vidro Ext Ar Vidro Int - Tipo de vão envidraçado - Tipo de gás aplicado)
U [W/(m²K)]	g	τ	€/m²	€/m²	€/m²	
1.6	0.26	0.43	95.3	113.2	23.8	6 12 6 - Controlo Solar + Baixa Emissividade Incolor - Ar
	0.14	0.12	139.1	158.0	33.2	6 12 6 - Controlo Solar + Baixa Emissividade Cinzento - Ar
	0.29	0.34	139.1	158.0	33.2	6 12 6 - Controlo Solar + Baixa Emissividade Azul - Ar
	0.59	0.61	84.6	102.2	21.5	6 12 6 - Vidro Controlo Solar Incolor - Ar
	0.47	0.68	97.5	115.4	24.2	4 12 4 - Baixa emissividade Verde - Ar
	0.40	0.48	118.6	137.1	28.8	4 12 6 - Baixa Emissividade Azul - Ar
2.8	0.14	0.34	160.5	180.0	37.8	8 8 12 - Vidro de Controlo Solar Cinzento - Ar
	0.26	0.12	123.2	141.8	29.8	8 12 6 - Vidro de Controlo Solar Azul - Ar
	0.29	0.12	141.6	160.6	33.7	6 14 8 - Vidro de Controlo Solar Azul - Ar
	0.4	0.36	116.4	134.8	28.3	6 12 6 - Vidro Controlo Solar Cinzento - Ar
	0.87	0.81	24.1	40.1	8.4	4 14 4 - Vidro Standard Incolor - Ar
3.3	0.59	0.36	70.1	87.3	18.3	5 6 4 - Vidro de Controlo Solar Incolor - Ar
	0.47	0.45	116.4	134.8	28.3	5 6 12 - Vidro de Controlo Solar Incolor - Ar
	0.26	0.21	148.2	167.5	35.2	6 6 12 - Vidro de Controlo Solar Verde - Ar
	0.29	0.61	113.8	132.2	27.8	6 6 4 - Vidro de Controlo Solar Azul - Ar

Tabela A.7: Custo económico das soluções de sombreamento dos vãos envidraçados considerados para obtenção das soluções apresentadas na secção 5.4 e secção 5.5 [102].

Tipo de sombreamento	Custo da solução [€/m²]	Custo de Investimento [€/m²]	Custo de Manutenção (10 anos) [€/m²]	Descrição da solução
Exterior	144.5	460.6	205.2	Estore veneziano interior com acionamento mecânico
Interior	56.7	68.3	17.1	Persiana enrolável interior

Edifícios de escritórios de baixas necessidades de energia –
Contributo da arquitetura e soluções passivas para soluções de custo-ótimo

Tabela A.8: Custo económico das soluções de iluminação consideradas para obtenção das soluções apresentadas na secção 5.4 e secção 5.5 [102].

Iluminação									
CFL	Zona	Área [m ²]	Densidade de Potência [W/m ²]	Descrição	Custo Lâmpada [€/26W]	Custo de Investimento [€/26W]	Custo de Manutenção (10 anos) [€/26W]	Custo [€/W]	Custo total [€/m ²]
Dimensionamento baseado numa lâmpada de 13W (850 lm)	Escritórios Sul e Norte	264	9.26	Luminária de 26 W redonda	86.5	110.1	60.3	3.3	30.8
	Escritórios Este e Oeste	96	9.26	Luminária de 26 W redonda	86.5	110.1	60.3	3.3	30.8
	Escritórios Interiores Este e Oeste	100	9.26	Luminária de 26 W redonda	86.5	110.1	60.3	3.3	30.8
	Zonas Comuns	180	1.85	Luminária de 26 W redonda	86.5	110.1	60.3	3.3	6.2
	Garagem	1100	0.93	Luminária de 18 W redonda	27.7	53.4	34.7	1.5	1.4
LED	Zona	Área [m ²]	Densidade de Potência [W/m ²]	Descrição	Custo Lâmpada [€/3W]	Custo de Investimento [€/3W]	Custo de Manutenção (10 anos) [€/3W]	Custo [€/W]	Custo total [€/m ²]
Dimensionamento baseado numa lâmpada de 12W (850 lm)	Escritórios Sul e Norte	264	5.60	3 LED de 1 W - redondo	142.0	158.7	87.3	47.3	265.1
	Escritórios Este e Oeste	96	5.60	3 LED de 1 W - redondo	142.0	158.7	87.3	47.3	265.1
	Escritórios Interiores Este e Oeste	100	5.60	3 LED de 1 W - redondo	142.0	158.7	87.3	47.3	265.1
	Zonas Comuns	180	1.10	3 LED de 1 W - redondo	142.0	158.7	87.3	47.3	52.1
	Garagem	1100	0.60	3 LED de 1 W - redondo	142.0	158.7	87.3	47.3	28.4

Tabela A.9: Custo económico das soluções de sistemas de ventilação consideradas para obtenção das soluções apresentadas na secção 5.4 e secção 5.5 [102].

Sistema de ventilação													
Tipo de sistema de ventilação	RPH	m ³ /h	Custo total da solução [€]	Custo da solução [€/m ³ h]	Custo da UTA [€]	Vida útil da UTA [anos]	Custo de manutenção - UTA [€/ano]	Custo das condutas de ventilação [€]	Vida útil das condutas [anos]	Custo de manutenção - Condutas [€/ano]	Custo de investimento [€]	Custo de manutenção [€]	Valor residual [€]
Ventilação Mecânica	1	17 000	63 247	3.72	26 607	20	3%	22 250	30	2%	48 857	18 496	19 543
	2	34 000	109 274	3.21	42 943	20	3%	42 376	30	2%	85 319	31 776	34 128
	3	51 000	162 533	3.19	62 186	20	3%	65 222	30	2%	127 408	47 162	50 963
	5	85 000	259 110	3.05	100 012	20	3%	102 840	30	2%	202 852	75 238	81 141
	7.5	127 500	402 332	3.16	162 524	20	3%	150 289	30	2%	312 813	117 257	125 125
	10	170 000	507 211	2.98	200 024	20	3%	195 789	30	2%	395 813	147 533	158 325
Ventilação Mecânica com recuperação de calor	1	17 000	79 208	4.66	37 643	20	3%	22 250	30	2%	59 893	23 422	23 957
	2	34 000	141 040	4.15	64 906	20	3%	42 376	30	2%	107 282	41 578	42 913
	3	51 000	208 122	4.08	93 707	20	3%	65 222	30	2%	158 929	61 231	63 572
	5	85 000	290 389	3.42	121 639	20	3%	102 840	30	2%	224 479	84 890	89 792
	7.5	127 500	471 013	3.69	210 010	20	3%	150 289	30	2%	360 299	138 451	144 120
	10	170 000	569 771	3.35	243 278	20	3%	195 789	30	2%	439 067	166 838	175 627
Ventilação Natural	1	17 000	42 087	2.48	22 333	20	3%	12 000	30	2%	34 333	9 968	13 733
	2	34 000	95 287	2.80	59 117	20	3%	12 000	30	2%	71 117	26 385	28 447
	3	51 000	121 887	2.39	77 508	20	3%	12 000	30	2%	89 508	34 594	35 803
	5	85 000	175 088	2.06	114 291	20	3%	12 000	30	2%	126 291	51 011	50 517
	7.5	127 500	241 588	1.89	160 270	20	3%	12 000	30	2%	172 270	71 533	68 908
	10	170 000	308 089	1.81	206 250	20	3%	12 000	30	2%	218 250	92 054	87 300

Edifícios de escritórios de baixas necessidades de energia –
 Contributo da arquitetura e soluções passivas para soluções de custo-ótimo

Tabela A.10: Custo de energia elétrica [103] e emissão de gases de efeito estufa [14], para as duas localizações do estudo, no período de cálculo considerado, para obtenção do custo global das soluções apresentadas na secção 5.4 e secção 5.5⁵.

Período de cálculo (20 anos)	Custos de energia elétrica [€/kWh]		Custos de emissão de gases de efeito estufa [€/kWh]
	Lisboa	Helsínquia	
2016	0.236	0.155	0.0020
2017	0.238	0.157	0.0020
2018	0.241	0.158	0.0020
2019	0.243	0.160	0.0020
2020	0.246	0.161	0.0020
2021	0.248	0.163	0.0020
2022	0.251	0.165	0.0020
2023	0.253	0.166	0.0020
2024	0.256	0.168	0.0020
2025	0.258	0.170	0.0020
2026	0.261	0.171	0.0035
2027	0.263	0.173	0.0035
2028	0.266	0.175	0.0035
2029	0.269	0.176	0.0035
2030	0.271	0.178	0.0035
2031	0.274	0.180	0.0051
2032	0.277	0.182	0.0051
2033	0.279	0.184	0.0051
2034	0.282	0.185	0.0051
2035	0.285	0.187	0.0051

⁵ O custo de emissão de gases de efeito estufa é apresentado em [€/tonCO₂], sendo este valor convertido para €/kWh, segundo o fator de conversão = 101.30 gCO₂/kWh [104].

Anexo C – Parâmetros de simulação

Tabela A.11: Valores de infiltração considerados para os vãos envidraçados dos modelos em estudo, calculados com base na informação de [95].

Modelo	WWR [%] (Pé-direito [m])	Valor de infiltração [h ⁻¹]
Geometria 1	10 (0.5 m)	0.055
	40 (2 m)	0.222
	80 (3 m)	0.333
Geometria 2	10 (0.5 m)	0.055
	40 (1.5 m)	0.167
	80 (3 m)	0.333
Geometria 3	10 (0.5 m)	0.055
	40 (1.5 m)	0.167
	80 (3 m)	0.333
GA1	10 (0.5 m)	0.055
	40 (1.5 m)	0.167
	80 (3 m)	0.333
	Abertura do átrio (20.9 m)	2.320
GA2	10 (0.5 m)	0.055
	40 (1.5 m)	0.167
	80 (3 m)	0.333
	Abertura do átrio (20.9 m)	2.320

Tabela A.12: Valores de caudal mínimo de ar novo aplicados aos modelos em estudo, calculados a partir de [96].

Modelo	Pé-direito [m]	Valor de caudal de ventilação [h ⁻¹]
Geometria 1	3.25	0.615
Geometria 2	3.50	0.571
Geometria 3	3.60	0.556
GA1	3.50	0.571
GA2	3.50	0.571

Tabela A.13: Dimensionamento da iluminação artificial nos modelos de edifícios em estudo [98].

Tipo de iluminação	Eficácia da lâmpada [lumens/W]	η ^{Lâmpada} [%]	Densidade de potência [W/m ²]	Zonas	Set-point [lux]
CFL	60	90	9.26	Escritórios	500
			1.85	Zonas Comuns	100
			0.93	Garagem	50
LED	100	90	5.60	Escritórios	500
			1.10	Zonas Comuns	100
			0.60	Garagem	50

Tabela A.14: Perfil horário de ocupação dos espaços de escritórios aplicados nos modelos em estudo [97].

horas	% de Ocupação	
	Segunda a sexta	Fins de semana
0h as 1h	0	0
1h as 2h	0	0
2h as 3h	0	0
3h as 4h	0	0
4h as 5h	0	0
5h as 6h	0	0
6h as 7h	10	0
7h as 8h	20	0
8h as 9 h	50	0
9h as 10h	90	0
10h as 11h	100	0
11h as 12h	100	0
12h as 13h	50	0
13h as 14h	70	0
14h as 15h	90	0
15h as 16h	100	0
16h as 17h	80	0
17h as 18h	50	0
18h as 19h	20	0
19h as 20h	10	0
20h as 21h	0	0
21h as 22h	0	0
22h as 23h	0	0
23h as 24h	0	0

Tabela A.15: Perfil horário de utilização de iluminação aplicado aos modelos em estudo [97].

horas	% de iluminação	
	Segunda a sexta	Fins de semana
0h as 1h	5	5
1h as 2h	5	5
2h as 3h	5	5
3h as 4h	5	5
4h as 5h	5	5
5h as 6h	5	5
6h as 7h	10	5
7h as 8h	30	5
8h as 9 h	75	5
9h as 10h	85	5
10h as 11h	100	5
11h as 12h	100	5
12h as 13h	50	5
13h as 14h	85	5
14h as 15h	95	5
15h as 16h	100	5
16h as 17h	95	5
17h as 18h	50	5
18h as 19h	30	5
19h as 20h	25	5
20h as 21h	5	5
21h as 22h	5	5
22h as 23h	5	5
23h as 24h	5	5

Tabela A.16: Perfil horário de utilização dos equipamentos elétricos aplicados aos modelos em estudo [97].

horas	% de equipamento	
	Segunda a sexta	Fins de semana
0h as 1h	15	15
1h as 2h	15	15
2h as 3h	15	15
3h as 4h	15	15
4h as 5h	15	15
5h as 6h	15	15
6h as 7h	30	15
7h as 8h	70	15
8h as 9h	85	15
9h as 10h	95	15
10h as 11h	100	15
11h as 12h	95	15
12h as 13h	70	15
13h as 14h	70	15
14h as 15h	95	15
15h as 16h	100	15
16h as 17h	90	15
17h as 18h	70	15
18h as 19h	45	15
19h as 20h	25	15
20h as 21h	15	15
21h as 22h	15	15
22h as 23h	15	15
23h as 24h	15	15

Anexo D – Índices de PCC

Tabela A.17: Valores de índices de PCC obtidos para a análise de SA da secção 5.5.2.1 para a situação de VM e VH nas duas localizações em estudo.

VM				VH			
HEL		LIS		HEL		LIS	
FF	0.938	FF	0.923	FF	0.917	FF	0.919
EE	0.787	EE	0.832	EE	0.661	EE	0.802
WWR	0.530	Iluminação	0.433	WWR	0.388	Iluminação	0.409
Iluminação	0.390	WWR	0.343	Iluminação	0.353	WWR	0.192
Uvão	0.161	g-value	0.276	Uvão	0.329	Uvão	0.151
Ocupação	0.077	isoPE	0.055	isoPAV	0.100	isoPAV	0.129
isoPAV	0.014	isoCOB	0.001	RPH	0.053	isoPE	0.122
g-value	-0.015	isoPAV	-0.001	isoPE	0.065	g-value	0.070
α_{sup}	-0.033	Sombreamento	-0.050	Sombreamento	-0.011	isoCOB	-0.006
Sombreamento	-0.033	α_{sup}	-0.057	α_{sup}	-0.029	Sombreamento	-0.010
isoPE	-0.092	Uvão	-0.075	Ocupação	-0.042	α_{sup}	-0.024
isoCOB	-0.147	Ocupação	-0.113	isoCOB	-0.071	RPH	-0.046
tvão	-0.182	tvão	-0.191	tvão	-0.080	tvão	-0.071
				g-value	-0.104	Ocupação	-0.083

Tabela A.18: Valores de índices de PCC obtidos para a análise de SA da secção 5.5.2.1 na situação de VM para as duas localizações em estudo e os três modelos de edifícios com variação de FF.

VM											
G1 (FF = 0.12)			G2 (FF = 0.23)				G3 (FF = 0.35)				
HEL		LIS		HEL		LIS		HEL		LIS	
EE	0.836	EE	0.933	EE	0.723	EE	0.643	WWR	0.813	EE	0.714
Iluminação	0.429	Iluminação	0.641	WWR	0.203	Iluminação	0.333	EE	0.747	WWR	0.683
Uvão	0.221	g	0.305	Ocupação	0.201	g	0.251	Iluminação	0.354	g	0.567
Ocupação	0.211	isoCOB	0.171	g	0.200	WWR	0.141	g	0.348	Iluminação	0.351
WWR	0.160	isoPE	0.133	Uvão	0.139	isoCOB	0.048	Uvão	0.106	isoPE	0.113
g	0.097	α_{sup}	0.112	Iluminação	0.136	Sombreamento	0.035	Ocupação	0.060	isoCOB	0.077
Sombreamento	0.055	Sombreamento	0.079	α_{sup}	0.062	α_{sup}	0.022	isoCOB	0.007	Sombreamento	-0.007
tvão	0.029	WWR	0.036	isoCOB	0.031	tvão	-0.002	Sombreamento	-0.086	Ocupação	-0.024
isoCOB	0.011	isoPAV	-0.048	Sombreamento	-0.007	isoPAV	-0.008	isoPAV	-0.098	tvão	-0.097
isoPE	-0.029	Ocupação	-0.067	isoPAV	-0.094	Uvão	-0.028	isoPE	-0.126	isoPAV	-0.110
isoPAV	-0.055	Uvão	-0.143	isoPE	-0.148	Ocupação	-0.076	α_{sup}	-0.138	α_{sup}	-0.110
α_{sup}	-0.104	tvão	-0.236	tvão	-0.184	isoPE	-0.090	tvão	-0.166	Uvão	-0.204

Tabela A.19: Valores de índices de PCC obtidos para a análise de SA da secção 5.5.2.1 na situação de VH para as duas localizações em estudo e os três modelos de edifícios com variação de FF.

VH											
G1 (FF = 0.12)			G2 (FF = 0.23)				G3 (FF = 0.35)				
HEL		LIS		HEL		LIS		HEL		LIS	
EE	0.396	EE	0.569	EE	0.990	EE	0.897	α_{sup}	0.220	g	0.290
Iluminação	0.242	RPH	0.188	Iluminação	0.880	Iluminação	0.469	Uvão	0.173	Uvão	0.209
Ocupação	0.145	Iluminação	0.120	WWR	0.656	isoPAV	0.236	WWR	0.152	α_{sup}	0.158
g	0.085	Sombreamento	0.044	Uvão	0.626	RPH	0.153	EE	0.109	WWR	0.146
WWR	0.035	Uvão	0.049	Ocupação	0.374	g	0.084	RPH	0.106	tvão	0.102
isoCOB	0.006	isoPAV	0.040	isoPAV	0.138	Sombreamento	0.052	Iluminação	0.104	RPH	0.062
RPH	0.003	tvão	0.005	α_{sup}	0.008	isoPE	0.014	tvão	0.088	Iluminação	0.049
isoPAV	-0.024	isoCOB	-0.018	Sombreamento	-0.082	tvão	0.000	g	0.047	Ocupação	0.019
α_{sup}	-0.030	isoPE	-0.027	RPH	-0.093	α_{sup}	-0.009	isoPAV	0.042	isoPAV	0.013
Uvão	-0.053	WWR	-0.035	g	-0.238	Uvão	-0.036	isoCOB	-0.046	isoEW	0.000
Sombreamento	-0.130	Ocupação	-0.054	tvão	-0.311	isoCOB	-0.162	Sombreamento	-0.060	isoCOB	-0.022
tvão	-0.130	α_{sup}	-0.102	isoCOB	-0.494	Ocupação	-0.162	Ocupação	-0.125	Sombreamento	-0.061
isoPE	-0.197	g	-0.133	isoPE	-0.506	WWR	-0.199	isoEW	-0.135	EE	-0.074

Anexo E – Índices obtidos no método de Morris

Tabela A.20: Classificação por ordem de importância dos índices do método de Morris obtidos para a análise de SA da secção 5.5.2.2 na situação de VM e VH para as duas localizações em estudo.

VM						VH					
HEL			LIS			HEL			LIS		
Variável	μ [kWhEP/m ² .ano]	σ [kWhEP/m ² .ano]	Variável	μ [kWhEP/m ² .ano]	σ [kWhEP/m ² .ano]	Variável	μ [kWhEP/m ² .ano]	σ [kWhEP/m ² .ano]	Variável	μ [kWhEP/m ² .ano]	σ [kWhEP/m ² .ano]
FF	317.4	164.1	FF	458.2	243.3	FF	266.2	162.0	FF	405.6	237.5
EE	52.4	30.2	EE	94.6	49.2	EE	42.8	34.7	WWR	53.8	44.7
Iluminação	20.2	6.4	WWR	38.2	47.3	WWR	30.2	35.8	EE	51.6	53.4
WWR	11.8	29.5	Iluminação	37.6	11.0	Iluminação	16.4	10.8	Sombreamento	32.8	44.7
g	9.6	10.1	g	35.0	37.6	Uvão	10.0	9.8	Iluminação	18.4	18.8
isoPE	8.6	7.9	tvão	14.2	19.9	Sombreamento	8.0	21.8	tvão	11.4	16.4
Sombreamento	7.4	14.8	Uvão	12.2	11.3	isoPE	5.8	3.8	isoCOB	11.0	24.0
Uvão	6.4	5.1	Sombreamento	12.0	22.2	Ocupação	5.4	4.7	Ocupação	9.4	13.7
tvão	4.6	6.3	isoCOB	9.8	22.5	g	4.8	8.4	Uvão	7.4	16.0
isoCOB	3.8	7.2	Ocupação	5.6	3.5	tvão	3.8	2.7	RPH	6.8	14.6
Ocupação	2.0	1.9	isoPE	2.8	3.3	isoCOB	2.6	1.6	g	4.6	6.5
isoPAV	0.6	1.0	isoPAV	2.6	2.7	isoPAV	0.6	1.3	isoPE	2.2	3.2
σ_{sup}	0.0	0.0	σ_{sup}	2.4	1.6	RPH	0.4	0.8	isoPAV	1.8	2.6
						σ_{sup}	0.4	0.8	σ_{sup}	1.6	2.1

Tabela A.21: Classificação por ordem de importância dos índices do método de Morris obtidos para a análise de SA da secção 5.5.2.2 na situação de VM para as duas localizações em estudo, e os três modelos de edifícios com variação de FF.

VM											
G1 (FF = 0.12)				G2 (FF = 0.23)				G3 (FF = 0.35)			
HEL		LIS		HEL		LIS		HEL		LIS	
Variável	μ [kWhEP/m ² .ano]	Variável	μ [kWhEP/m ² .ano]	Variável	μ [kWhEP/m ² .ano]	Variável	μ [kWhEP/m ² .ano]	Variável	μ [kWhEP/m ² .ano]	Variável	μ [kWhEP/m ² .ano]
EE	23.2	WWR	31.0	EE	48.4	WWR	96.6	EE	149.4	WWR	351.4
WWR	14.4	EE	27.8	WWR	28.4	EE	95.6	WWR	131.8	EE	257.0
Iluminação	10.8	g	22.2	Sombreamento	21.4	Uvão	87.0	Sombreamento	73.4	Uvão	253.2
Uvão	14.0	Sombreamento	22.2	Uvão	13.6	g	81.2	g	35.0	g	177.0
g	9.6	Uvão	19.2	Iluminação	13.2	isoPAV	43.4	Uvão	32.0	isoPAV	126.4
tvão	6.6	isoPAV	18.8	isoPAV	12.0	tvão	41.8	Iluminação	26.6	tvão	113.6
isoPAV	6.0	Iluminação	16.0	isoPE	11.0	σ_{sup}	30.6	isoPE	26.0	σ_{sup}	97.6
Sombreamento	5.4	isoPE	13.8	tvão	11.0	Iluminação	24.8	Ocupação	24.8	Sombreamento	73.4
isoCOB	4.2	σ_{sup}	12.2	Ocupação	9.6	Sombreamento	20.8	isoPAV	24.4	isoPAV	71.6
σ_{sup}	4.2	isoCOB	11.2	σ_{sup}	9.4	isoPE	20.0	tvão	24.4	isoCOB	46.6
isoPE	4.0	tvão	9.2	g	9.0	Ocupação	17.4	σ_{sup}	23.6	Iluminação	41.8
Ocupação	2.4	Ocupação	6.2	isoCOB	6.4	isoCOB	15.4	isoCOB	5.0	Ocupação	37.6

Tabela A.22: Classificação por ordem de importância dos índices do método de Morris obtidos para a análise de SA da secção 5.5.2.2 na situação de VH para as duas localizações em estudo, e os três modelos de edifícios com variação de FF.

VH											
G1 (FF = 0.12)				G2 (FF = 0.23)				G3 (FF = 0.35)			
HEL		LIS		HEL		LIS		HEL		LIS	
Variável	μ [kWhEP/m ² .ano]	Variável	μ [kWhEP/m ² .ano]	Variável	μ [kWhEP/m ² .ano]	Variável	μ [kWhEP/m ² .ano]	Variável	μ [kWhEP/m ² .ano]	Variável	μ [kWhEP/m ² .ano]
Iluminação	24.8	EE	24.2	EE	74.6	EE	24.2	g	94.4	EE	156.2
EE	17.8	Iluminação	8.0	Iluminação	20.0	Iluminação	8.0	EE	63.8	WWR	86.8
Ocupação	10.0	WWR	4.6	isoPE	10.6	WWR	4.6	Uvão	60.0	Iluminação	52.0
isoPAV	8.8	g	2.0	Uvão	7.4	g	2.0	Iluminação	55.0	g	23.4
Sombreamento	7.6	tvão	2.0	WWR	5.2	tvão	2.0	Ocupação	49.4	Sombreamento	8.6
isoPE	5.6	Sombreamento	1.0	tvão	4.6	Sombreamento	1.0	isoCOB	49.2	RPH	8.6
Uvão	5.4	Uvão	0.8	Ocupação	3.8	Uvão	0.8	WWR	38.2	Uvão	6.8
RPH	4.0	RPH	0.8	Sombreamento	2.2	RPH	0.8	isoPE	34.0	tvão	6.8
WWR	3.8	Ocupação	0.6	isoCOB	2.2	Ocupação	0.6	tvão	27.2	Ocupação	2.2
isoCOB	2.6	σ_{sup}	0.2	g	1.2	σ_{sup}	0.2	isoPAV	24.2	σ_{sup}	1.8
tvão	2.0	isoPE	0.0	RPH	0.8	isoPE	0.0	Sombreamento	24.2	isoPE	1.4
σ_{sup}	1.8	isoCOB	0.0	isoPAV	0.6	isoCOB	0.0	σ_{sup}	23.8	isoPAV	1.0
g	1.4	isoPAV	0.0	σ_{sup}	0.6	isoPAV	0.0	RPH	1.8	isoCOB	0.4