

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



Simulação Computacional de um Sistema de
Ventilação Natural para uma Torre de Escritórios
em Lisboa

Daniel Pedro Paquito de Albuquerque

Dissertação

Mestrado Integrado em Engenharia da Energia e do Ambiente

2014

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



Simulação Computacional de um Sistema de
Ventilação Natural para uma Torre de Escritórios
em Lisboa

Daniel Pedro Paquito de Albuquerque

Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia da Energia e do Ambiente

Trabalho realizado sob a supervisão de
Professor Doutor Guilherme Carrilho da Graça (FCUL)

2014

“Ventilation is a science, and it requires the study of a lifetime to master properly all its intricacies.” –

Parkes

Agradecimentos

Em primeiro lugar gostaria de agradecer aos meus pais pela aposta que fizeram em mim, por terem estado ao lado em todos momentos da minha vida e por tanto me inspirarem todos os dias. Agradeço-vos o vosso amor incondicional e a motivação incansável.

À minha restante família que teve um papel fundamental na minha evolução enquanto pessoa e por toda a compreensão e apoio que me demonstram diariamente.

À Elisabete, por todo o seu amor e carinho demonstrados durante estes anos. Por toda a compreensão, ajuda e conselhos ao longo do meu percurso académico e, especialmente, nos meses de realização deste trabalho. A sua presença fez claramente a diferença nos momentos mais difíceis.

Ao professor Guilherme Carrilho da Graça pela possibilidade de trabalhar neste tema, partilha de conhecimentos, motivação e conselhos ao longo deste trabalho.

Um agradecimento especial ao Nuno Mateus por todo o acompanhamento prestado em todas as fases desta tese. Devo-te um obrigado por toda a tua experiência que partilhaste comigo.

Ao António Soares pelo acompanhamento, ajuda e motivação durante grande parte deste último ano.

Agradeço igualmente a todos os elementos do grupo de edifícios (Pedro, Francisco, Raquel, Sara, Filipa, Nuno e Patrícia) pelo apoio, amizade e entajuda durante estes últimos meses.

Aos meus melhores amigos André F., André J., Miguel, Pedro e Ricardo por todo o apoio durante todos estes anos, tanto durante todo o meu percurso académico como na minha vida pessoal.

Aos restantes amigos por serem quem são, por me apoiarem e por me tornarem uma melhor pessoa todos os dias.

Abstract

Recently, interest in NV use in service buildings has been rising. In the milder months of the year, NV is becoming an alternative to mechanical systems due to its potential to reduce cooling energy demand. In these systems, air movement through the building is powered by buoyancy forces or the wind, or a combination of the two. This thesis presents an application of building thermal simulation tools to the design of naturally ventilated office tower. The seventeen story building is located in the center of Lisbon and will have an adjacent small park. The external building skin is shaped like an accordion with vertical fins. This special facade shape created particular challenges for the design team, namely which portions should be opaque or transparent, which shading systems should be used, where should the natural ventilation openings be positioned. Further, the building internal geometry imposes single-sided natural systems ventilation.

The building facade and natural ventilation system design were optimised using three interrelated simulation tools. Solar incidence in the building skin was analysed and optimised using *Autodesk Ecotect Analysis*. Building thermal response and HVAC loads were obtained using *EnergyPlus*. Wind driven single-sided ventilation flow was simulated using CFD. In addition CFD was used to assess outside wind comfort conditions. The dynamic thermal simulation (*EnergyPlus*) incorporated inputs from the other simulations tools: the optimised facade obtained from the *Ecotect* analysis and the local airflow velocities that drive the single-sided natural ventilation airflow model that is incorporated in the simulation engine. Simulation results show that, as a result of the optimisation effort and Lisbon's mild climate, the building is expected to operate in natural mode for 70% of the year.

Keywords: Single-sided Natural Ventilation; Pedestrian Wind Comfort; CFD; EnergyPlus.

Resumo

Recentemente, o interesse pelo uso Ventilação Natural em edifícios de serviço tem vindo a crescer. Nos meses mais amenos do ano, a Ventilação Natural tem-se tornado uma alternativa aos sistemas de ventilação mecânica devido ao seu potencial para reduzir as necessidades de arrefecimento. Nestes sistemas, o movimento do ar através do edifício é impulsionado pelas forças X e pelo vento, ou pela combinação das duas. Esta tese apresenta uma aplicação de ferramentas de simulação térmica em edifícios para dimensionar uma torre de escritórios ventilada naturalmente. O edifício de dezassete andares está localizado no centro de Lisboa e terá um pequeno jardim adjacente. A fachada exterior do edifício tem um formato em fole. Esta forma específica criou desafios adicionais à equipa de projeto, nomeadamente que partes da fachada deveriam ser opacas ou transparentes, que tipos de sistemas de sombreamento se deveriam usar e onde deveriam estar posicionadas as aberturas para a ventilação natural. Posteriormente, a geometria interna do edifício impôs a utilização de sistemas de ventilação natural *single-sided*.

A fachada do edifício e o dimensionamento do sistema de ventilação natural foram otimizados através da utilização de três ferramentas de simulação relacionadas entre si. A radiação solar incidente na fachada do edifício foi analisada e otimizada através do programa *Autodesk Ecotect Analysis*. O comportamento térmico do edifício e as cargas de climatização foram obtidas pelo programa *EnergyPlus*. Os caudais de ventilação *single-sided* resultantes da acção do vento foram simulados em CFD. Adicionalmente, o CFD foi utilizado para avaliar as condições de conforto térmico exterior por ação do vento. A simulação dinâmica (*EnergyPlus*) incluiu *inputs* de outras ferramentas de simulação: a fachada otimizada obtida pela análise do *Ecotect* e a velocidade do vento local que originou o caudal de ventilação natural *single-sided* do modelo. Os resultados da simulação demonstram que, como consequência do esforço de otimização e do clima ameno de Lisboa, é esperado que o edifício opere de um modo natural durante 70% do ano.

Palavras-Chave: Ventilação Natural Single-sided; Conforto Térmico Exterior; CFD; EnergyPlus.

Índice

1. Introdução.....	1
1.1. Enquadramento.....	1
1.2. Objetivos.....	2
1.3. Questões de Investigação.....	2
1.4. Estrutura da Tese	3
2. Revisão Bibliográfica.....	4
2.1. <i>Computational Fluid Dynamics (CFD) – PHOENICS</i>	4
2.2. Simulação Dinâmica de Edifícios.....	6
2.2.1. Transferência de Calor.....	6
2.2.1.1. Condução.....	6
2.2.1.2. Convecção	7
2.2.1.3. Radiação	8
2.2.2. Caracterização do comportamento térmico de edifícios.....	9
2.2.3. Ferramenta de Simulação Térmica - <i>EnergyPlus</i>	11
2.3. Conforto Térmico Exterior	13
3. Caso de Estudo	15
3.1. Definição e Localização	15
4. Metodologia	17
4.1. <i>Autodesk Ecotect Analysis</i>	17
4.2. <i>PHOENICS</i>	21
4.3. <i>EnergyPlus</i>	27
5. Resultados	43
5.1. <i>Autodesk Ecotect Analysis</i>	43
5.2. <i>PHOENICS</i>	45
5.3. <i>EnergyPlus</i>	51
6. Conclusão	55
7. Referências Bibliográficas	57

Índice de Figuras

Figura 1 - Sentido do fluxo de calor para um gradiente de temperaturas unidirecional [].	7
Figura 2 - Etapas associadas à simulação de um modelo em <i>EnergyPlus</i> – Adaptado de Mateus (2012) [].	12
Figura 3 - Critérios de avaliação do conforto térmica exterior por ação do vento – Willemsen et al. (2007) [].	14
Figura 4 - Divisão da área total da torre em 3 zonas.	15
Figura 5 - Imagem aérea de enquadramento à zona de intervenção – representada a azul (Vista de Sul). Fonte: http://www.bing.com/maps/	16
Figura 6 - Imagem da envolvente com renderização da torre, jardim e ciclovía (Vista de Norte). Fonte: Barbas Lopes Arquitectos.	16
Figura 7 - Clima de referência de Lisboa com temperatura [°C] e radiação [W/m ²].	18
Figura 8 - Modelo geométrico com as orientações das principais fachadas, vista de topo (sombreamento para 1 de Junho às 12h00 GMT+1).	18
Figura 9 - Modelo geométrico: vista de Sul à esquerda e de Norte à direita (sombreamento para 1 de Junho às 12h00 GMT+1).	19
Figura 10 - Modelo geométrico, vista de topo e percurso solar (sombreamento para 1 de Junho às 12h00 GMT+1).	19
Figura 11 - Superfícies representativas dos formatos de fachada avaliados.	20
Figura 12 - Exemplo do sombreamento adotado para os vãos envidraçados a Sul.	21
Figura 13 - Desenho final da Torre da Cidade e da sua envolvente no <i>PHOENICS</i> (Vista de Sul).	22
Figura 14 - Dimensões do domínio usado no programa <i>PHOENICS</i> (Norte coincidente com o eixo y).	23
Figura 15 - Refinamento da rede de células computacional (Vista de Topo; Norte coincidente com o eixo y).	24
Figura 16 - Refinamento da rede de células computacional (Vista Frontal; Norte coincidente com o eixo y).	24
Figura 17 - Visualização em detalhe das superfícies de controlo usadas (Vista de Sul).	25
Figura 18 - Identificação das zonas do modelo (Vista de Sul).	28
Figura 19 - Identificação das fronteiras do modelo e respetivas coordenadas internas (Vista de topo).	29

Figura 20 - Fachada com 100% de vãos envidraçados (Vista de SE).	34
Figura 21 - Fachada com 40% de vãos envidraçados orientados a Sul (Vista de SE). ..	34
Figura 22 - Fachada com 40% de vãos envidraçados orientados a Sul com sombreamento (Vista de SE).	35
Figura 23 - Fachada com 30% de vãos envidraçados orientados a Este (Vista de SE)..	38
Figura 24 - Radiação incidente anual na fachada NE, com orientação N (Unidades: [W/m ²]).	43
Figura 25 - Radiação incidente anual na fachada SE, com orientação E (Unidades: [W/m ²]).	43
Figura 26 - Radiação incidente anual na fachada SE, com orientação S (Unidades: [W/m ²]).	44
Figura 27 - Radiação incidente anual na fachada SE, com orientação S (Unidades: [W/m ²]).	44
Figura 28 - Velocidades do vento em todo o domínio da simulação a 1.5 m de altura (Vista de topo, Norte coincide com Y).	46
Figura 29 - Velocidades do vento na zona urbanizada a 1.5 m de altura (Vista de topo, Norte para cima).	46
Figura 30 - Velocidades do vento em todo o domínio (Vista de Este).	47
Figura 31 - Velocidades do vento junto da Torre da Cidade (Vista de Este).	47

Índice de Gráficos

Gráfico 1 – Resumo do estudo do AEA para todas as orientações das principais fachadas.	45
Gráfico 2 - Consumo elétrico dos cinco cenários estudados.	51
Gráfico 3 - Interação do sistema de ventilação natural no Inverno.	53
Gráfico 4 - Interação do sistema de ventilação natural no Verão.	53
Gráfico 5 - Interação do sistema de ventilação natural no Outono/Primavera.	53

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Resumo das Configurações Computacionais.	27
Tabela 2 - Condições-fronteira exteriores para cada superfície do modelo.	29
Tabela 3 - Características dos 5 modelos estudados.....	30
Tabela 4 - Constituição das superfícies dos quatro modelos.....	31
Tabela 5 - Constituição do vidro duplo para o EnergyPlus.....	31
Tabela 6 - Horários de ocupação, de funcionamento da iluminação e equipamentos e de disponibilidade do sistema AVAC considerados no EnergyPlus.....	32
Tabela 7 - Valores atribuídos aos objetos constituintes dos modelos.	33
Tabela 8 - Disponibilidade anual do sistema de ventilação natural.	37
Tabela 9 - Dados de referência por especificação do RECS.	39
Tabela 10 - Intervalos do valor de RIEE para a determinação da classe energética.	40
Tabela 11 - Rácios de velocidade em função da direção do vento (I).....	49
Tabela 12 - Rácios de velocidade em função da direção do vento (II).	49
Tabela 13 - Rácios de velocidade em função da direção do vento (III).	50
Tabela 14 - Avaliação do efeito do vento no conforto exterior sob ação do vento.	50
Tabela 15 - Classe energética dos quatro cenários considerados.....	52

Índice de Esquemas

Esquema 1 – Interação simplificada das ferramentas utilizadas.	17
Esquema 2 – Esquema detalhado da metodologia usada - Adaptado de Papadopoulos (2013) [].....	42

Glossário/Abreviações/Abreviaturas

AEA – *Autodesk Ecotect Analysis*

AI – Área de Interesse

AIJ – *Architectural Institute of Japan*

AVAC – Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado

CFD – *Computacional Fluid Dynamics*

COP – *Coefficient of Performance*

DOE – *Department of Energy*

DPI – Densidade de Potência de Iluminação [W/m²]

EER – *Energy Efficiency Ratio*

ICU – Ilha de Calor Urbana

ILAS – Ideal Loads Air System

INETI – Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação

IPMA – Instituto Português do Mar e da Atmosfera

LNEG – Laboratório Nacional de Energia e Geologia

NEN – Instituto de Normalização da Holanda

RANS – *Reynolds-averaged Navier-Stokes*

RECS – Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços

SCE – Sistema de Certificação Energética dos Edifícios

SFP – *Specific Fan Power*

UTAN – Unidade de Tratamento de Ar Novo

Nomenclatura/Simbologia

H – Altura do edifício em estudo

$H_{\text{máx}}$ – Altura do maior edifício presente da Área de Interesse

$IEE_{\text{pr,S}}$ – Indicador de Eficiência Energética previsto

IEE_{REN} – Indicador de Eficiência Energética renovável, associado à produção de energia elétrica e térmica por fontes de energia renováveis

$IEE_{\text{ref,S}}$ – Indicador de Eficiência Energética de referência

kWh_e – kilowatt-hora elétrico

kWh_{EP} – kilowatt-hora equivalente de petróleo

kWh_t – kilowatt-hora térmico

P_{SFP} – Potência Específica [$\text{W}/(\text{m}^3/\text{s})$]

R_{IEE} – Rácio de classe energética

“I always find theoretical men rather inclined to look with a certain amount of disdain upon practical men, and to think that practical men know nothing about their subject unless they follow the dictates of theorists. But they are now paying much more attention to the teachings of experience.” –

Sir William Preece

1. Introdução

1.1. Enquadramento

No início do século XXI houve um aumento generalizado dos preços da energia originando uma racionalização dessa mesma energia. Nessa mesma altura, a eficiência energética passou a ser uma forte aposta de entidades privadas e públicas, onde se tentou manter as mesmas práticas de consumo com equipamentos mais eficientes. Em 2008, quando houve a grande crise económica e financeira mundial, a preocupação das entidades mudou novamente, sendo que nesse momento a intenção seria diminuir os custos da energia o máximo possível, mesmo que implicasse alguma restrição do comportamento consumista habitual.

A manutenção das temperaturas de conforto térmico é responsável por elevados consumos de energia nos edifícios, tendo-se registado nos últimos anos uma tendência da utilização de sistemas de ventilação natural de forma a diminuir os gastos. Contudo, este tipo de ventilação é bastante antigo, havendo registos da sua utilização pelo menos desde o século XII, com a utilização de torres de captação de vento.

Com a utilização de sistemas de ventilação mecânicos, o tipo de ventilação escolhido era maioritariamente em modo de mistura completa do ar nos espaços. No entanto, como forma de obtenção de um maior conforto térmico, boa qualidade do ar ou de introdução de sistemas de ventilação natural tem sido utilizado um outro tipo de ventilação designado de estratificação térmica. Estes tipos de ventilação podem, contudo, ser conseguidos através de múltiplas estratégias de ventilação natural, enumerando-se: *single-sided ventilation*, *cross ventilation*, *corner ventilation* e *stratum ventilation* originadas por efeito de ação do vento; ou chaminés solares que funcionam com base na impulsão térmica do ar.

Este trabalho utilizará uma estratégia de ventilação *single-sided* num tipo de ventilação do ar completamente misturado para uma torre de escritórios. Para alcançar o anteriormente mencionado é preciso determinar as velocidades médias do vento na zona urbana onde se insere a torre, sendo necessário recorrer-se a uma ferramenta de simulação computacional de fluidos tridimensionais (CFD). Esta última permitirá que se conheçam as velocidades do ar junto ao edifício que, no fundo, acabam por ser o grande

impulsionador da ventilação natural. Seguidamente, efetuar-se-á uma análise térmica anual dos escritórios com a utilização de um *software* de simulação dinâmica de edifícios.

1.2. Objetivos

Esta dissertação de mestrado tem como objetivos avaliar e otimizar o sistema de ventilação natural de uma torre de escritórios que será construída numa zona urbanizada de Lisboa. O sistema de ventilação natural terá que garantir um caudal mínimo de ar novo capaz de manter uma boa qualidade do ar interior e adequadas condições de conforto térmico. Estes dois parâmetros serão avaliados de acordo com o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços (RECS) do Sistema de Certificação Energética dos Edifícios (SCE).

Os sistemas de ventilação natural são controláveis, embora as condições que promovem a ventilação natural sejam imprevisíveis, dificultando a manutenção da qualidade do ar e do conforto térmico durante todo o ano [1]. Consequentemente, um sistema de Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado (AVAC) será dimensionado para cumprir com as exigências do RECS quando o sistema de ventilação natural não for capaz de o fazer. Deste modo, garantir-se-á tanto a maximização da ventilação natural, como a minimização da utilização do sistema AVAC. Relativamente ao jardim adjacente à torre de escritórios, avaliar-se-á o efeito do vento no conforto térmico exterior dos pedestres, atribuindo-se graus de conforto consoante o seu tipo de atividade.

1.3. Questões de Investigação

Depois de um breve enquadramento geral e da definição dos principais objetivos, surgem as principais questões de investigação, às quais este documento procurará dar uma resposta. As questões de investigação são:

- Qual o comportamento do sistema de ventilação natural durante o ano?
- De que forma o uso do sistema de ventilação natural afeta o dimensionamento do sistema AVAC? E o consumo elétrico?
- Qual o efeito do vento no conforto térmico exterior dos pedestres? Como garantir a fiabilidade dos resultados?
- Caso o conforto exterior não seja atingido, que medidas se devem adotar?

1.4. Estrutura da Tese

Este documento está estruturado do seguinte modo:

No Capítulo 2 é efetuada uma introdução aos conceitos teóricos necessários para a compreensão das temáticas que este trabalho irá abordar, nomeadamente radiação solar, ventilação natural, transferência de calor e balanço térmico. É também feito um levantamento do Estado-da-Arte relativo: à aplicação de *Computational Fluid Dynamics* (CFD) para avaliação dos perfis de vento em ambiente urbano e do seu efeito no conforto térmico exterior; e ao uso do programa *EnergyPlus* em simulações dinâmicas em edifícios.

No Capítulo 3 é apresentado com detalhe o caso de estudo desta dissertação e o seu enquadramento urbano.

No Capítulo 4 é explicada toda a metodologia efetuada durante este trabalho e apresentados os fundamentos que apoiam as escolhas efetuadas no projeto com base na literatura.

No Capítulo 5 encontram-se os resultados obtidos. No Capítulo 6 são avaliados os resultados do capítulo apresentado anteriormente e são retiradas as principais conclusões deste trabalho. Ainda neste capítulo faz-se referência às limitações da abordagem utilizada e sugerem-se tópicos para desenvolvimento futuro.

2. Revisão Bibliográfica

2.1. *Computational Fluid Dynamics (CFD) – PHOENICS*

Como ferramenta computacional de simulação dinâmica de fluidos foi utilizado o programa *PHOENICS*.

O *PHOENICS* é uma ferramenta de simulação tridimensional de fluidos que usa técnicas de CFD para prever quantitativamente como o escoamento de um certo fluido (ar, água, dióxido de carbono, etc.) se comportam dentro e à volta de elementos, tais como edifícios, seres humanos e motores automóveis. Este programa existe desde 1981 e tem servido de base a estudos desenvolvidos por uma comunidade especializada (desde arquitetos e engenheiros aos professores académicos e seus alunos) em áreas como a aviação, a conceção e construção civil, o ambiente, etc..

O programa é dividido em 3 módulos: pré-processamento, processamento dos dados e pós-processamento. No primeiro módulo é feita a descrição do modelo, recorrendo ao seu desenho e definição das suas características, definindo-se igualmente as variáveis de projeto, o modelo de turbulência, o número de iterações mínimo e máximo e os critérios de convergência (percentagem de erro da solução). O segundo módulo é responsável pela simulação computacional do modelo descrito, resolvendo-o com recurso a modelos de turbulência previamente selecionados. O último módulo consiste na apresentação dos resultados por via de uma ferramenta de visualização de dados.

O *PHOENICS* tem como principais potencialidades o facto de simular escoamentos:

- Laminares e turbulentos;
- Compressíveis ou incompressíveis;
- Estacionários ou transientes;
- (quimicamente) Inertes ou reativo;
- Um estado físico ou mais.

Para conseguir resolver todo este tipo de escoamentos, o programa é capaz de resolver equações de conservação de massa (Equação 1) [2], momento e energia recorrendo a elementos discretos de espaço e tempo (volume finitos), conhecidos como células. A

estruturada rede de células do *PHOENICS* pode tanto ser criada com base em coordenadas cartesianas, como cilíndricas ou curvilíneas adaptadas ao corpo presente no modelo [3].

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w) = 0 \quad (1)$$

onde:

ρ – Densidade do fluido [kg/m^3];

t – Tempo [s];

(x, y, z) – Coordenadas cartesianas [m];

(u, v, w) – Componentes do vetor velocidade [m/s].

Como o nome indica, o *PHOENICS* recorre a modelos de turbulência para simular corretamente os escoamentos turbulentos, que têm como sua característica flutuações quase-aleatórias, onde a escala de tempo e a dimensão dessas flutuações são bastante pequenas comparadas com a escala de tempo do escoamento médio e dimensões do domínio em estudo [4].

Para escoamentos turbulentos, estacionários e incompressíveis o *PHOENICS* recorre às equações *Reynolds-averaged Navier-Stokes* (RANS) para calcular uma solução média das várias variáveis do problema.

O modelo de turbulência $k-\epsilon$ é dos mais utilizados e estudados em CFD, nomeadamente para em estudos de escoamentos em ambiente urbano [5]. Este modelo é composto por duas equações (2 e 3) que representam a energia cinética turbulenta (k) e a taxa de dissipação de energia (ϵ) do escoamento médio, respetivamente [6, 7]:

$$k = \frac{1}{2} \langle u_i u_i \rangle = \frac{1}{2} (\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}) \quad (2)$$

$$Re_L \equiv \frac{ul}{\nu} = \frac{u^4}{\nu \epsilon} \quad (3)$$

onde:

Re_L – Número de Reynolds turbulento;

ν – Viscosidade [m^2/s];

l – Escala de comprimentos (escala integral) [m].

2.2. Simulação Dinâmica de Edifícios

Neste capítulo são apresentados os conceitos teóricos de transferência de calor em edifícios, assim como a caracterização do seu comportamento térmico. É ainda efetuada a caracterização da ferramenta computacional de simulação dinâmica usada neste trabalho.

2.2.1. Transferência de Calor

O fenómeno da transferência de calor ocorre sempre que existe uma diferença de temperatura entre dois meios ou entre dois pontos de um mesmo meio. Esta transferência de calor ocorre no sentido do meio de temperatura mais elevada para o meio de temperatura mais baixa, com o objetivo de atingir um estado de equilíbrio térmico, respeitando a segunda lei e a lei zero da termodinâmica, respetivamente. No processo de transferência de calor há conservação de energia, sendo que a energia cedida do meio com maior temperatura será igual à energia recebida pelo meio com menor temperatura (primeira lei da termodinâmica).

Existem três mecanismos de transferência de calor:

- Condução;
- Convecção;
- Radiação.

2.2.1.1. Condução

A condução térmica, como mecanismo de transferência de calor, difere consoante o tipo de meio em que ocorre. Nos gases que apresentam movimento molecular aleatório (difusão) e não apresentam movimento macroscópico (advecção), a condução térmica ocorre ao nível dos movimentos de translação, rotação e vibração das moléculas, assim como da própria colisão entre as várias moléculas constituintes desse gás. Os líquidos apresentam uma estrutura molecular mais forte e menos dispersa que os gases, originando apenas uma interação entre moléculas mais frequente. Nos sólidos não condutores elétricos, a transferência de calor por condução térmica ocorre exclusivamente por vibração da sua rede molecular. Por último, nos sólidos condutores elétricos, a

transferência de calor dá-se tanto pelo movimento de translação dos elétrons livres como pela vibração da rede molecular [8, 9].

O fluxo de calor obtido por condução térmica é dado pela lei de Fourier (Equação 4) e representa a taxa de transferência de calor unidirecional por unidade de área perpendicular à direção da transferência de calor:

$$q''_x = -k \frac{dT}{dx} \quad (4)$$

onde:

q''_x – Fluxo de calor por condução [W/m²];

k – Condutividade térmica do material [W/m.K];

$\frac{dT}{dx}$ – Gradiente de temperatura [K/m].

De referir que o sinal negativo que se encontra na lei de Fourier expressa exatamente o sentido do fluxo de calor na direção da menor temperatura, como mostra a Figura 1.

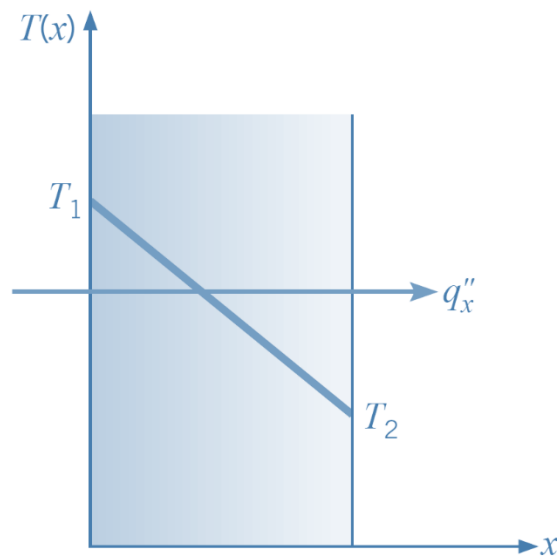


Figura 1 - Sentido do fluxo de calor para um gradiente de temperaturas unidirecional [10].

2.2.1.2. Convecção

O mecanismo de transferência de calor por convecção ocorre pela diferença de temperaturas entre uma superfície e um fluido. A convecção pressupõe a ocorrência de

dois fenómenos simultaneamente: o movimento molecular aleatório (difusão) e o movimento macroscópico (advecção) do fluido [11, 12].

O fluxo de calor convectivo é dado pela lei do arrefecimento de Newton (Equação 5):

$$q''_{\text{conv}} = h_c(T_s - T_\infty) \quad (5)$$

onde:

q'' – Fluxo de calor por convecção [W/m^2];

h_c – Coeficiente de transferência de calor por convecção [$\text{W}/\text{m}^2.\text{K}$];

T_s – Temperatura da superfície [K];

T_∞ – Temperatura do fluido fora da camada-limite [K].

2.2.1.3. Radiação

A emissão radiação ocorre sempre um determinado corpo (sólido, líquido ou gasoso) apresenta uma temperatura superior ao zero absoluto, ou seja, a 0 K. Esta transferência de calor é baseada na emissão de fótons entre uma superfície e um outro qualquer meio a diferentes temperaturas. Contrariamente à condução e à convecção, a emissão de radiação não necessita de um meio material para se propagar, podendo propagar-se no vácuo [13, 14].

Assim, a transferência de calor por radiação é expressa pela seguinte equação:

$$q_{\text{rad}} = h_r A (T_s - T_{\text{sur}}) \quad (6)$$

onde:

q_{rad} – Fluxo de calor por radiação [W];

h_r – Coeficiente de transferência de calor por radiação [$\text{W}/\text{m}^2.\text{K}$];

A – Área do corpo [m^2];

T_s – Temperatura da superfície do corpo 1 [K];

T_{sur} – Temperatura ambiente [K].

2.2.2. Caracterização do comportamento térmico de edifícios

Depois da introdução teórica dos três mecanismos de transferência de calor, é apresentado neste capítulo a forma como estes processos estão aplicados a edifícios, nomeadamente no cálculo do balanço térmico. Contudo, o balanço térmico apresenta novos parâmetros como:

- ganhos internos – devidos à atividade metabólica dos ocupantes, à iluminação dos espaços e à utilização de equipamentos;
- ganhos solares – através dos vãos envidraçados;
- ganhos de ventilação – transferência de calor por ventilação dos espaços com sistemas de ventilação mecânica ou natural;
- carga de climatização – transferência de calor por climatização dos espaços;
- transferência de calor pela envolvente ao edifício.

O balanço térmico de um edifício pode ser expresso pela equação 7.

$$G_i + G_s + G_v + G_c = \rho C_p V_s \frac{\delta T_i}{\delta t} + \sum_{n=1}^k A_n U_n (T_i - T_{sn}) \quad (7)$$

onde:

G_i – Ganhos internos [W];

G_s – Ganhos solares [W];

G_v – Ganhos devido a ventilação [W];

G_c – Carga de climatização [W];

$\rho C_p V_s \frac{\delta T_i}{\delta t}$ – Ganhos devido à energia armazenada do próprio ar interior [W];

$\sum_{n=1}^k A_n U_n (T_i - T_{sn})$ – Perdas pela envolvente [W];

ρ – Densidade do fluido [kg/m³];

C_p – Calor específico [J/kg.K];

V_s – Volume do fluido [m³];

$\frac{\partial T_i}{\partial t}$ – Variação da temperatura interior para um intervalo de tempo [K/s];

A_n – Área da superfície n [m²];

U_n – Coeficiente de transmissão térmica da superfície n [W/m.K];

T_i – Temperatura interior [K];

T_{sn} – Temperatura da superfície n [K].

Os ganhos solares, de ventilação e de climatização (UTA ou ventilo-convector) podem ser definidos pelas 3 seguintes equações, respetivamente:

$$G_s = A_v F_s (R_{dir} \cos(AT) \cos(AZ) + F_{f-C} R_{dif}) C_c \quad (8)$$

$$G_v = \rho C_p \dot{V}_v (T_e - T_i) \quad (9)$$

$$G_c = \rho C_p \dot{V}_c (T_{ins} - T_i) \quad (10)$$

onde:

A_v – Área do vão envidraçado [m²];

F_s – Fator Solar;

R_{dir} – Radiação direta [W/m²];

AT – Altura Solar [°];

AZ – Azimute Solar [°];

F_{f-C} – Fator de forma entre vão envidraçado e o céu;

R_{dif} – Radiação difusa [W/m²];

C_c – fator de transferência de calor sensível para o ar interior;

\dot{V} – Caudal de fluido [m³/s];

T_e – Temperatura exterior [K];

T_{ins} – Temperatura de insuflação do ar [K].

2.2.3. Ferramenta de Simulação Térmica - *EnergyPlus*

Como ferramenta computacional de simulação dinâmica de edifícios foi utilizado o programa *EnergyPlus* 8.1.0.009.

O *EnergyPlus* surgiu da união de dois antigos programas (BLAST e DOE-2) de simulação dinâmica de edifícios lançados no início da década de 80 do século XX. É um programa que usa o conceito *open-source* de forma a garantir o seu *debugging* e desenvolvimento por parte dos utilizadores ou programadores. Deste modo, o *EnergyPlus* pretende aperfeiçoar-se às exigências dos atuais e futuros projetos, aceitando sugestões de melhoria aos modelos ou à criação de novos.

Sequencialmente, a utilização do *EnergyPlus* deve respeitar as seguintes etapas de construção de um modelo até à sua simulação. Inicialmente, constrói-se o modelo geométrico do edificado, seguido da definição das propriedades dos seus materiais constituintes e dos parâmetros que o definam tanto exterior (ficheiro climático, localização geográfica, orientação do edificado, etc.) como interiormente (sombreamento, ocupação, iluminação, infiltração, temperaturas de conforto térmico, etc.).

As simulações do *EnergyPlus* iniciam com a transferência de dados relativos à descrição do modelo para dois módulos: módulo de simulação do balanço térmico e módulo de sistemas. Esta informação permite ao módulo de simulação do balanço térmico atualizar as condições das zonas constituintes do modelo que, por sua vez, serão *input* do módulo de sistemas. Este último é responsável pelo cálculo das necessidades de arrefecimento e aquecimento das zonas, sendo esta informação reencaminhada para o módulo de simulação do balanço térmico, que procederá à atualização das condições das zonas para o *timestep* seguinte.

A Figura 2 mostra exatamente todas as etapas que estão associadas às simulações dinâmicas dos edifícios em *EnergyPlus*.

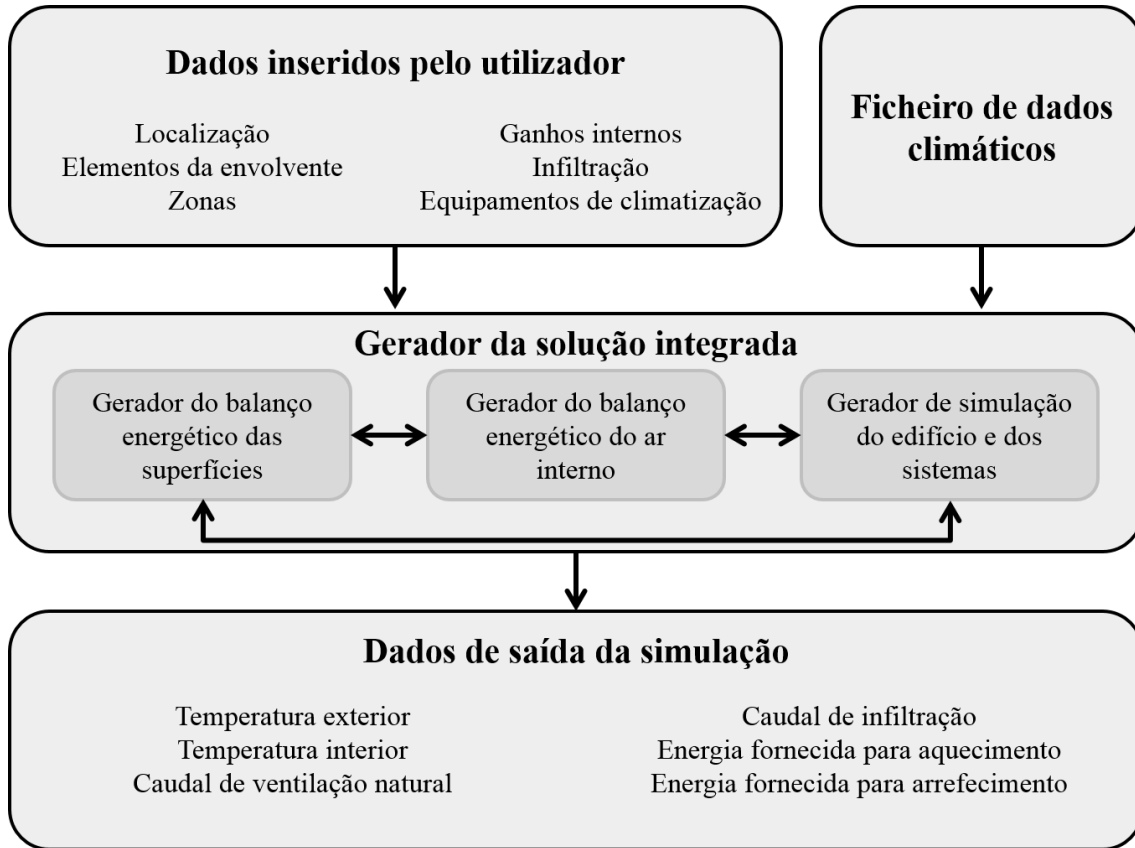


Figura 2 - Etapas associadas à simulação de um modelo em *EnergyPlus* – Adaptado de Mateus (2012) [15].

A equação 11 demonstra o método utilizado pelo *EnergyPlus* para calcular o balanço térmico para uma zona z a cada *timestep*.

$$C_z \frac{dT_s}{dt} = \sum_{i=1}^{Nsl} \dot{Q}_i + \sum_{i=1}^{Nsuperficies} h_i A_i (T_{si} - T_z) + \sum_{i=1}^{Nzonas} \dot{m}_i C_p (T_{zi} - T_z) + \dot{m}_{inf} C_p (T_{\infty} - T_z) + \dot{Q}_{sys} \quad (11)$$

onde:

$C_z \frac{dT_s}{dt}$ – Energia armazenada no ar [W];

$\sum_{i=1}^{Nsl} \dot{Q}_i$ – Somatório de ganhos internos convectivos [W];

$\sum_{i=1}^{Nsuperficies} h_i A_i (T_{si} - T_z)$ – Transferência de calor convectivo pelas superfícies da zona [W];

$$\sum_{i=1}^{N_{zonas}} \dot{m}_i C_p (T_{zi} - T_z) - \text{Transferência de calor devido a misturas de ar entre zonas [W];}$$

$$\dot{m}_{\text{inf}} C_p (T_{\infty} - T_s) - \text{Transferência de calor devido a infiltração de ar exterior [W];}$$

$$\dot{Q}_{\text{sys}} = \dot{m}_{\text{sys}} C_p (T_{\text{sup}} - T_z) - \text{Carga térmica do sistema AVAC da zona [W].}$$

O *EnergyPlus* tem demonstrado ser uma ferramenta útil para a vários estudos de simulação de ventilação natural em edifícios [16, 17, 18], inclusive para simulações de ventilação natural com uma estratégia *single-sided* [19, 20, 21].

2.3. Conforto Térmico Exterior

O conforto térmico pode ser definido como todas as condições em que um indivíduo se sente satisfeito com o ambiente térmico envolvente [22]. O conforto térmico exterior, por sua vez, está principalmente relacionado com aspetos termofisiológicos, ou seja, com a fisiologia e balanço térmico do corpo humano [23]. Os aspetos termofisiológicos podem ser afetados múltiplos parâmetros, entre eles destacam-se a velocidade do vento, a temperatura do ar, temperatura média radiante, a humidade reativa, a radiação solar, a qualidade do ar, a atividade metabólica, o vestuário e a idade [24, 25]. Desde a década de 80 do século XX que o interesse no conforto térmico exterior vem aumentando, muito devido à crescente preocupação com os pedestres em zonas fortemente urbanizadas, nomeadamente em grandes praças e nos designados “desfiladeiros urbanos” (*urban canyons*) [26, 27]. Estes últimos elementos são alguns dos responsáveis pelas alterações das condições climáticas nas cidades, criando um microclima próprio denominado por ilha de calor urbana (ICU). Este fenómeno é considerado um dos maiores problemas ambientais urbanos em todo o mundo [28]. A origem desta ilha de calor urbana, que corresponde a alterações locais da temperatura do ar, está associada à presença de elementos de elevada rugosidade que diminuem a velocidade de vento horizontal (*urban canyons*) em contraste com elementos de baixa rugosidade (praças) que aumentam a velocidade do ar [29].

Embora exista um elevado número de parâmetros que influenciam o conforto térmico exterior, o seu estudo sai fora do âmbito desta tese. Para o conhecimento da avaliação do conforto térmico exterior utilizando outros parâmetros, aconselha-se a leitura do artigo Chen et al. (2012) [30].

Este estudo irá focar-se no conforto térmico exterior por ação do vento (*pedestrian wind comfort*) e, como tal, foi utilizado uma norma realizada pelo Instituto de Normalização da Holanda (NEN). No ano de 2006, a norma de avaliação de conforto térmico por ação do vento foi inserida na publicação NEN 8100 do instituto, sendo posteriormente publicada em inglês por Willemsen et al. (2007) [31]. Até à data, esta é a única norma de avaliação de conforto térmico exterior por ação do vento existente em todo o mundo [32]. Esta norma já foi utilizada por diversos estudos de condições de conforto térmico exterior [33, 34, 35, 36, 37].

Esta avaliação tem por base o apresentado na Figura 3, onde é avaliada a probabilidade anual do vento ser superior a 5 m/s e é atribuída uma classe de conforto. Por sua vez, a classe de conforto é subdividida em três tipos de atividades exteriores comuns dos pedestres, onde é atribuído, qualitativamente, o grau de conforto associado.

O mesmo procedimento é aconselhado para uma probabilidade de vento superior a 15 m/s, onde é avaliado o perigo que estas velocidades de vento podem representar para os pedestres.

Criteria for wind comfort and danger

Wind comfort

$P(V_{15} > 5 \text{ m/s})$ (in % hours per year)	Grade	Activity area		
		Traversing	Strolling	Sitting
<2.5	A	Good	Good	Good
2.5–5.0	B	Good	Good	Moderate
5.0–10	C	Good	Moderate	Poor
10–20	D	Moderate	Poor	Poor
>20	E	Poor	Poor	Poor

Wind danger

$P(V_{15} > 15 \text{ m/s})$ in % hours per year	Limited risk Dangerous	0.05–0.3% hours per year >0.3% hour per year
--	---------------------------	---

Figura 3 - Critérios de avaliação do conforto térmica exterior por ação do vento – Willemsen et al. (2007) [38].

3. Caso de Estudo

3.1. Definição e Localização

Este documento apresenta o estudo de uma torre de escritórios, apelidada de Torre da Cidade. A torre será constituída por 23 pisos, sendo que 6 deles são reservados a estacionamento subterrâneo, terá uma altura de cerca de 70 metros e ocupa uma área de 1400 m². Nos 17 pisos superiores, com uma área total de 23 000 m², os espaços de circulação e as instalações sanitárias representam praticamente 20% da área por piso. Esta torre tem ainda a particularidade das suas fachadas apresentarem um formato de um fole (Figura 4).

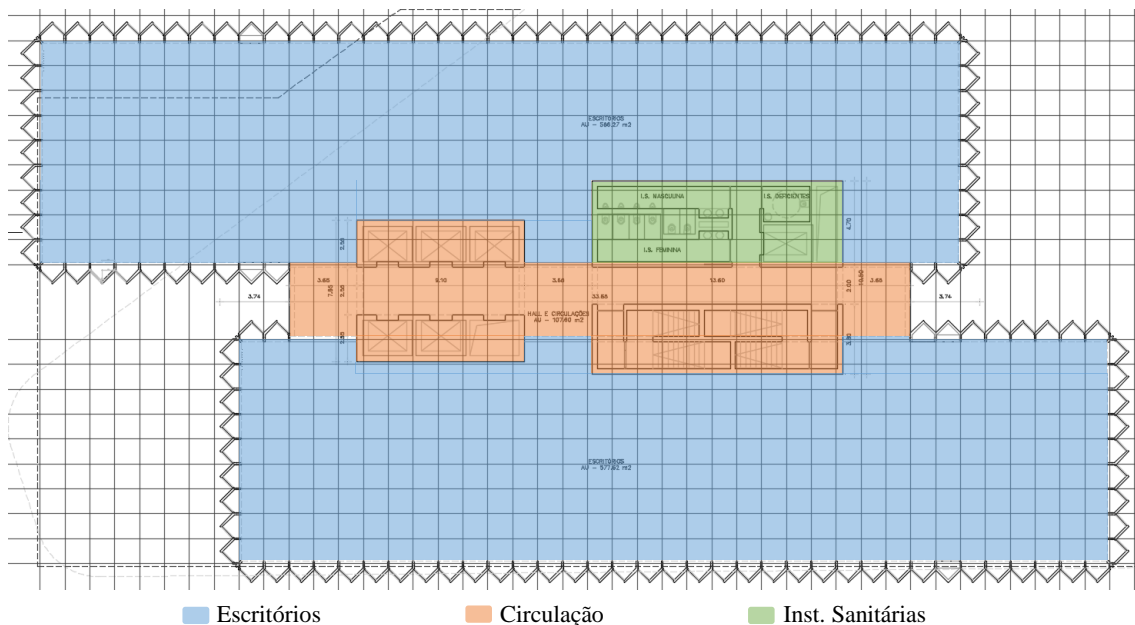


Figura 4 - Divisão da área total da torre em 3 zonas.

A Torre da Cidade está localizada no centro de Lisboa, sendo o seu enquadramento urbano demonstrado na Figura 5. É identificado a Sudoeste a Praça Marquês de Pombal, a Nordeste a Praça Duque Saldanha e a Avenida Fontes Pereira de Melo na ligação entre as duas primeiras, apresentando-se uma ampliação do local da torre. A torre de escritórios encontrar-se-á na zona de interseção entre a Avenida Fontes Pereira de Melo e a Avenida 5 de Outubro.

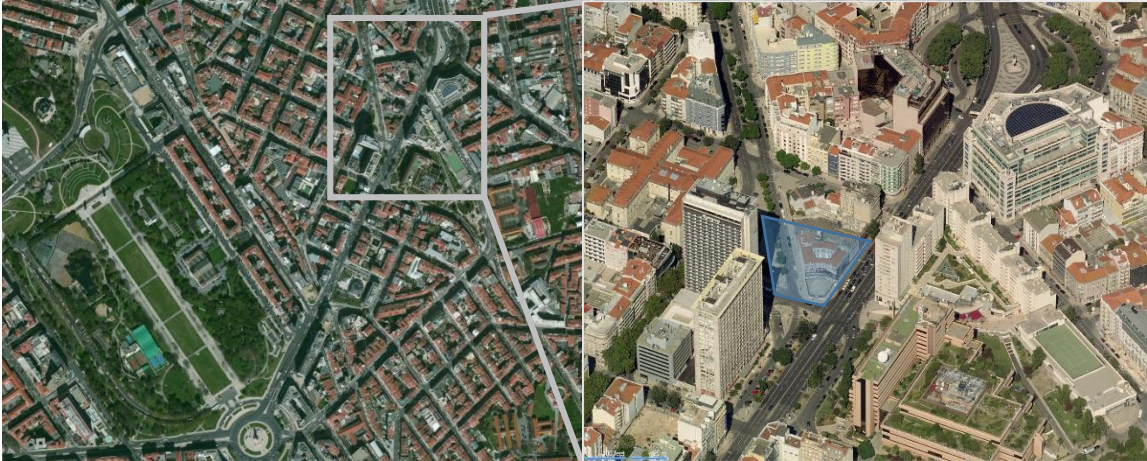


Figura 5 - Imagem aérea de enquadramento à zona de intervenção – representada a azul (Vista de Sul).

Fonte: <http://www.bing.com/maps/>

Adicionalmente, está prevista a requalificação do Jardim Augusto Monjardino confinado entre a torre, a Maternidade Alfredo da Costa (MAC) e o Hotel Sheraton. Esta requalificação prevê o alargamento do jardim para a atual estrada da Rua 5 de Outubro, conjuntamente com uma ciclovia à frente da MAC, onde é hoje a Rua Viriato (Figura 6).



Figura 6 - Imagem da envolvente com renderização da torre, jardim e ciclovia (Vista de Norte). Fonte:

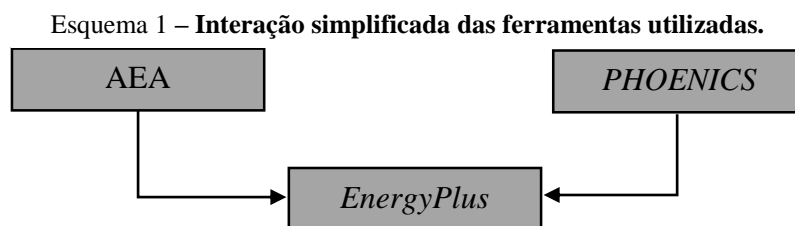
Barbas Lopes Arquitectos.

4. Metodologia

No desenvolvimento deste trabalho usaram-se várias ferramentas computacionais, mas para não tornar a sua descrição demasiado exaustiva, apenas se fará referência à metodologia das três principais ferramentas utilizadas:

1. *Autodesk Ecotect Analysis* (AEA);
2. *PHOENICS*;
3. *EnergyPlus*.

O Esquema 1 é uma versão simplificada que reflete a interação entre as três ferramentas.



4.1. *Autodesk Ecotect Analysis*

Os edifícios de serviços nos países do Sul da Europa (tipicamente com clima temperado mediterrânico) apresentam necessidades de arrefecimento dos seus espaços praticamente durante todo o ano devido às suas elevadas cargas térmicas interiores [39]. Assim, como primeira etapa deste estudo começou-se por analisar a quantidade de radiação incidente nas principais fachadas da Torre da Cidade, através do *Autodesk Ecotect Analysis* (AEA). Este programa tem a capacidade de simular o percurso e radiação solares, conjuntamente com a análise de sombreamentos e reflexões. Deste modo, o AEA permitirá conhecer a interação do Sol com o edifício, nomeadamente os ganhos solares a que o edifício estará sujeito e de que forma se poderão minimizar os mesmos com eventuais soluções mitigadoras.

Inicialmente, foi obtido um clima de referência (Figura 7), através do ficheiro climático da cidade de Lisboa [40], onde são apresentadas as seguintes grandezas de um dia típico de cada mês: temperatura máxima; temperatura mínima; temperatura média; radiação direta; e radiação difusa. Seguidamente, com base no modelo 3D da cidade de Lisboa, foi desenhado o modelo apresentado (Figura 8 e Figura 9), onde está representado tanto a

Torre da Cidade como a envolvente considerada relevante para o sombreamento na torre. O impacto dos restantes edifícios neste exercício estimou-se ser reduzido, dada a distância a que se encontram e/ou a sua altura.

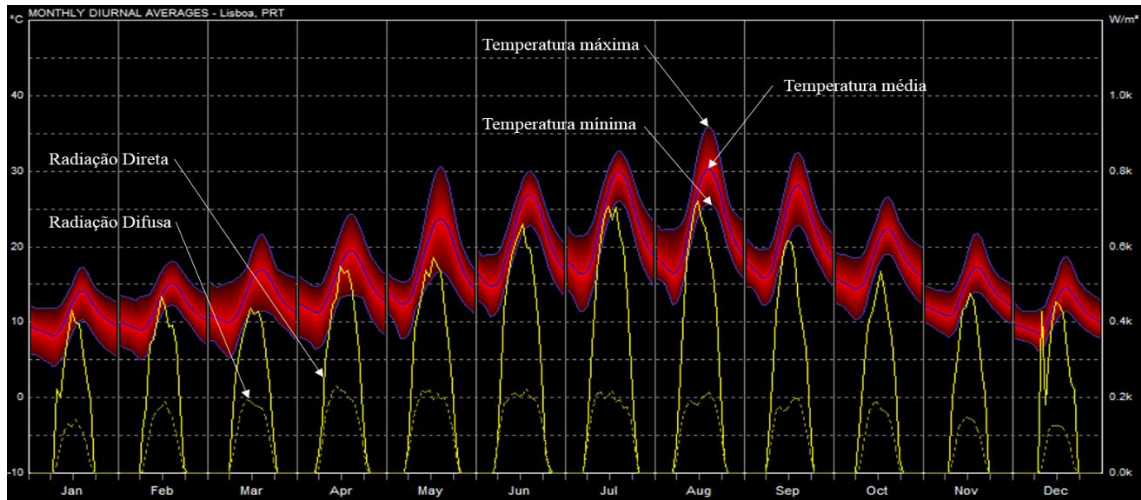


Figura 7 - Clima de referência de Lisboa com temperatura [°C] e radiação [W/m²].

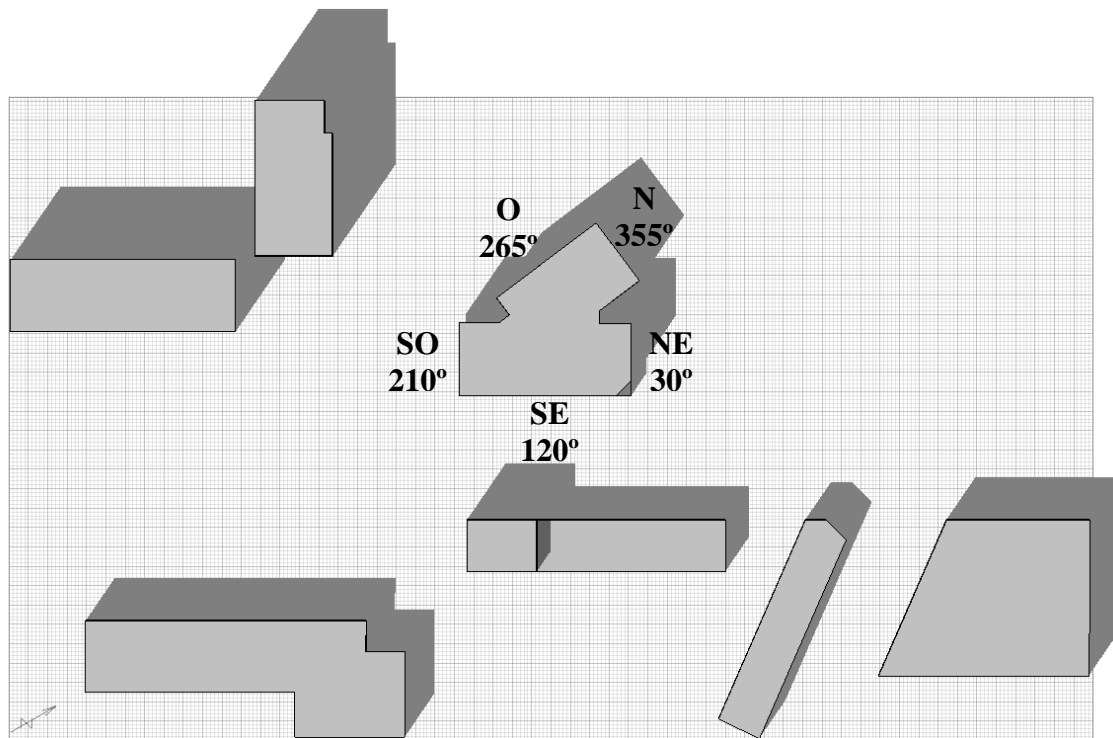


Figura 8 - Modelo geométrico com as orientações das principais fachadas, vista de topo (sombreamento para 1 de Junho às 12h00 GMT+1).

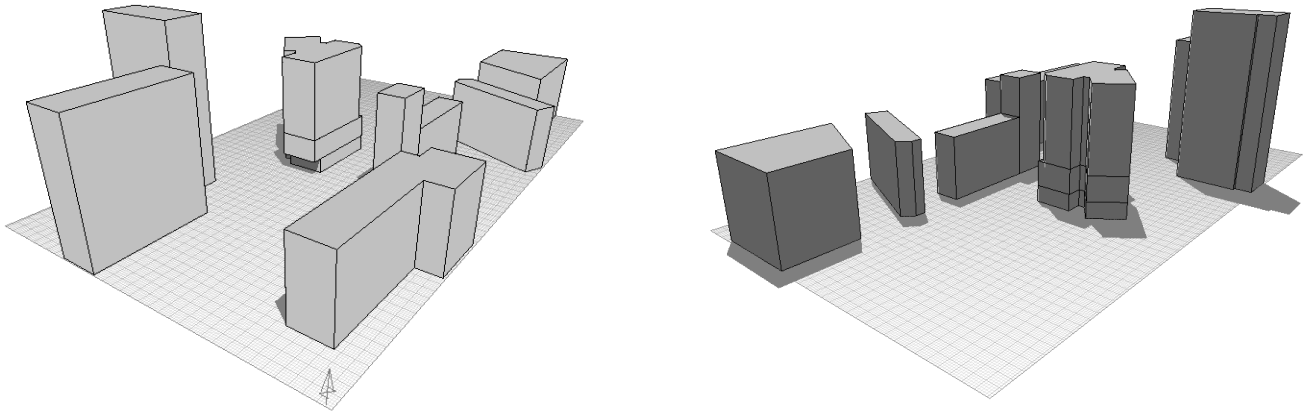


Figura 9 - Modelo geométrico: vista de Sul à esquerda e de Norte à direita (sombreamento para 1 de Junho às 12h00 GMT+1).

Assim, o AEA descreve por completo o percurso solar anual (Figura 10) e a radiação incidente numa qualquer superfície seleccionada.

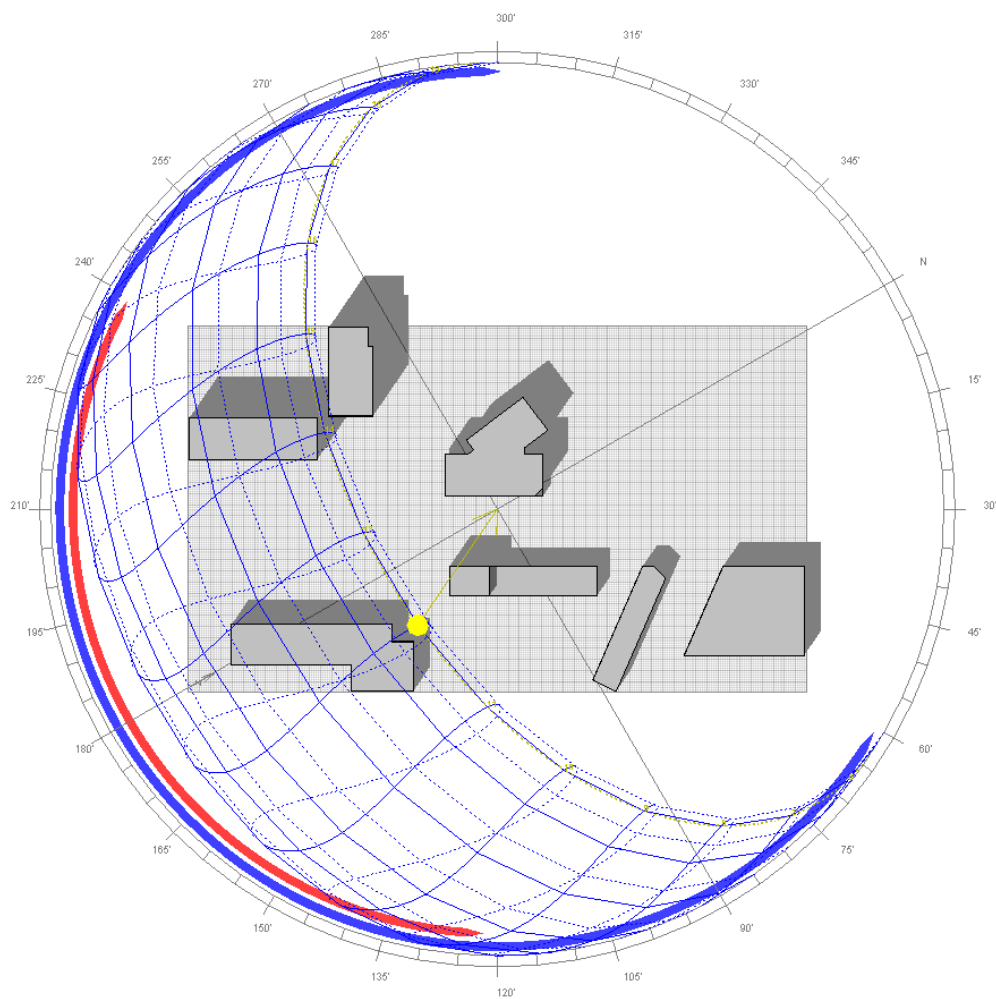


Figura 10 - Modelo geométrico, vista de topo e percurso solar (sombreamento para 1 de Junho às 12h00 GMT+1).

Nesta análise, como forma de simplificação, criaram-se superfícies que representassem o formato de fachada a ser avaliado. Assim, realizaram-se duas análises sobre a radiação incidente no edifício (Figura 11):

- fachadas planas em duas alturas específicas do edifício (a 1/3 e 2/3 da altura da Torre, designadas de posição *Low* e *High*);
- fachadas com formato em fole, apenas com a altura *High*.

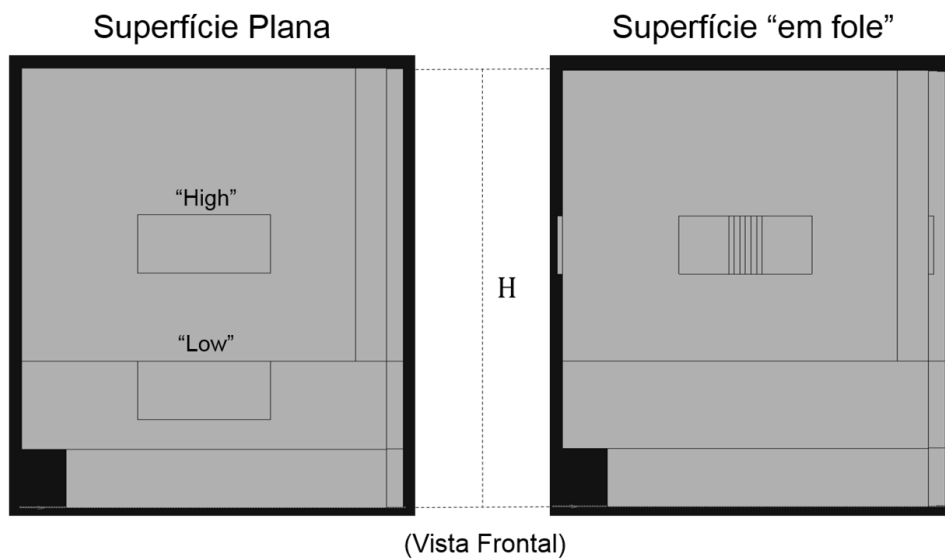


Figura 11 - Superfícies representativas dos formatos de fachada avaliados.

Foi ainda efetuado um estudo de mitigação da radiação incidente no edifício, nomeadamente optando por fachadas opacas em direções onde a altura solar é muito baixa (Oeste e Este) e por sombrear alguns dos vãos envidraçados localizados a Sul. A decisão de sombrear apenas os vãos a Sul prende-se com o facto de esta direção ser mais suscetível a uma boa estratégia de sombreamento sem alterar significativamente o formato exterior da fachada em fole. A Figura 12 apresenta o método de sombreamento usado, consistindo em palas de 95cm de comprimento (igual ao da fachada), com uma profundidade de 20 cm e separadas verticalmente de 30 cm.

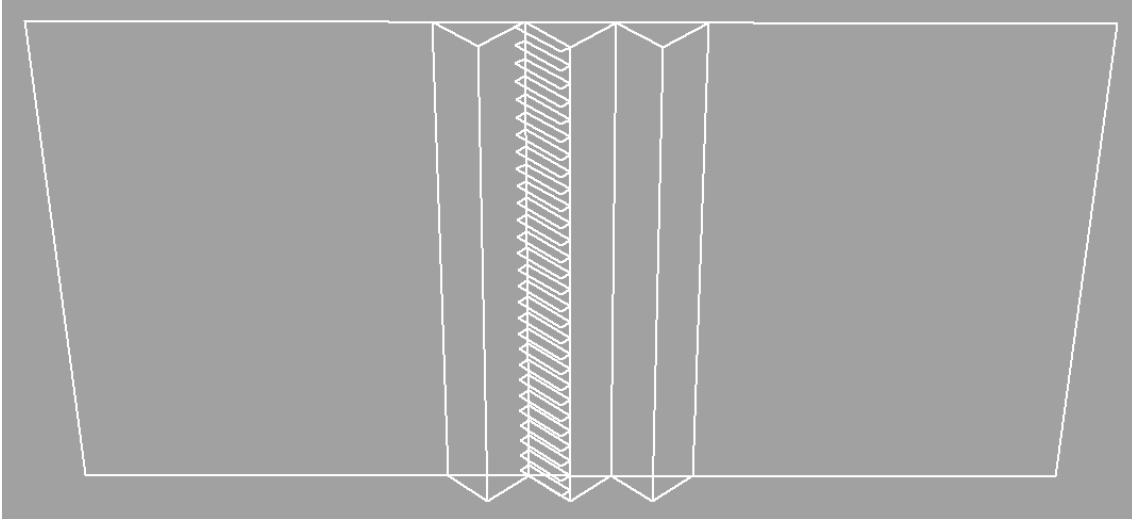


Figura 12 - Exemplo do sombreamento adotado para os vãos envidraçados a Sul.

4.2. PHOENICS

Para avaliar o potencial da ventilação natural nos edifícios recorrendo a uma estratégia de ventilação *single-sided* usou-se o programa PHOENICS que permite obter a velocidade do vento junto ao edifício. Esta ferramenta é um programa comercial de CFD que simulará o comportamento do vento em ambiente urbano. A ferramenta servirá igualmente para avaliar o impacto da localização e forma dos edifícios nas velocidades de vento a baixas altitudes ($< 2\text{m}$), nomeadamente junto ao futuro Jardim Augusto Monjardino. Esta avaliação permitirá conhecer se existem condições de desconforto exterior devido ao efeito do vento.

Inicialmente procedeu-se ao desenho do modelo 3D (Figura 13) da Torre da Cidade e da sua envolvente, considerando um raio de cerca de 200m em redor do edifício em estudo. Este desenho cumpre o definido pelo *Architectural Institute of Japan* (AIJ) que recomenda a representação da envolvente com uma Área de Interesse (AI) dentro de um raio que vai de $1H$ a $2H$, sendo H a altura do edifício alvo (Torre da Cidade) [41].

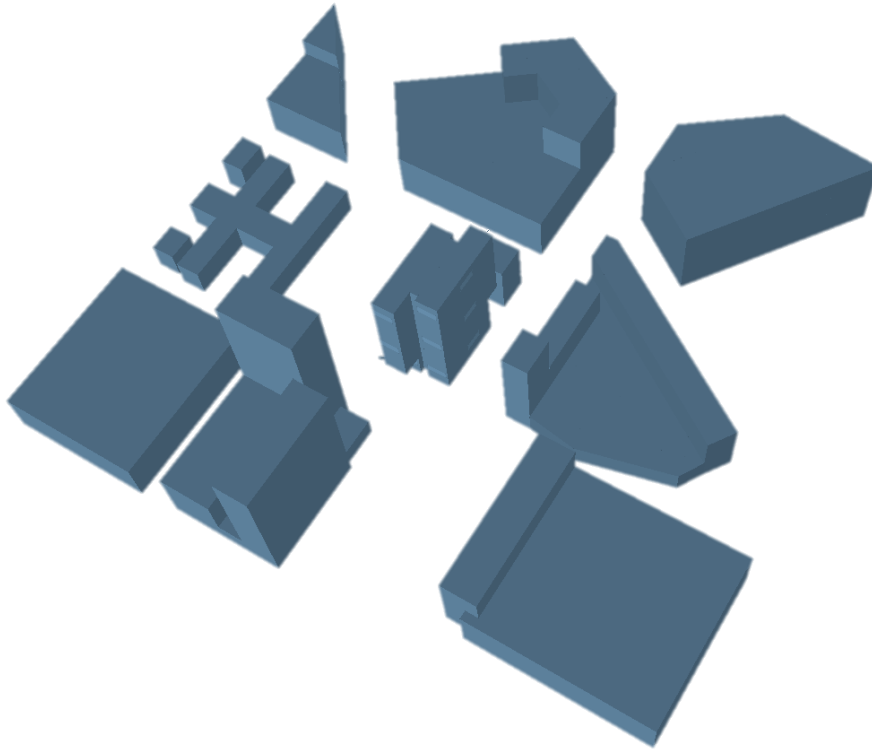


Figura 13 - Desenho final da Torre da Cidade e da sua envolvente no *PHOENICS* (Vista de Sul). O detalhe usado no desenho da Torre da Cidade e da envolvente foi diferente, pois segundo Blocken et al. (2008) [42], o edifício em estudo pode ser modelado com maior detalhe, enquanto os edifícios da envolvente podem ser desenhados apenas com as suas principais formas.

Estando a AI já desenhada, houve a necessidade de definir o tamanho do domínio da simulação. Com base num guia de recomendações da COST Action 732 [43, 44] relativo às boas práticas de simulação em CFD de ambientes urbanos definiram-se as seguintes dimensões do domínio (Figura 14):

- **Altura** - Para zonas urbanas com múltiplos edifícios, a altura do domínio deverá ficar a uma distância de 5 vezes a altura do maior edifício da AI ($H_{máx}$), ou seja, a altura final do domínio será de $6H_{máx}$.
- **Laterais** - a distância das fronteiras laterais do domínio até à fronteira da AI pode ser inferior a $5H_{máx}$, tendo-se considerado o valor de $5H_{máx}$.
- **Entrada do caudal (*Inflow*)** - é recomendado que a distância da *inlet* à AI deva ser, no mínimo, de $2H_{máx}$ (para rácios de obstrução inferiores a 10%). Considerou-se por uma distância de $5H_{máx}$

- **Saída do caudal (*Outflow*)** - definiu-se a distância da *outlet* à AI como sendo de $10H_{m\acute{a}x}$, pois as recomendações afirmam que para um edifício isolado a distância deve ser superior $15H_{m\acute{a}x}$, embora para áreas urbanas com múltiplos edifícios se possa definir uma distância inferior a esta.

Quando se usaram dimensões do domínio superiores às mínimas recomendadas considerou-se ainda que o rácio de obstrução do caudal não pode ser maior que 3%.

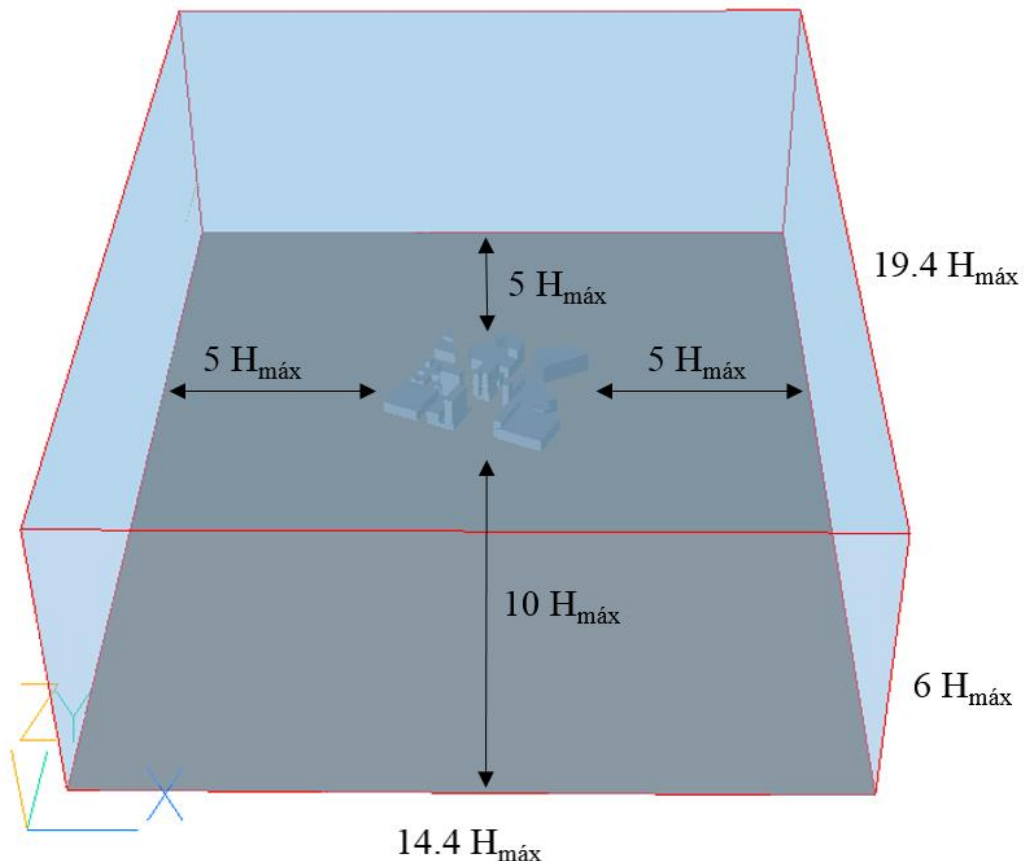


Figura 14 - Dimensões do domínio usado no programa PHOENICS (Norte coincidente com o eixo y).

Seguidamente, preparam-se 8 simulações para as 8 direções de vento estudadas, conhecidas como os 4 pontos cardiais e 4 pontos colaterais. Para cada direção rodou-se a AI em 45° e mantiveram-se as dimensões do domínio. Usou-se o modelo de turbulência *standard* k- ϵ por ser um modelo robusto e com reconhecidas capacidades neste tipo de simulações [45]. Os perfis de vento definidos nas *inlets* são logarítmicos, têm uma velocidade de referência de 10 m/s a uma altura de referência de 10 m (típica altura de registo de uma estação meteorológica) e uma rugosidade, típica para uma cidade, de 0.75 m [46]. As laterais do domínio, assim como o topo e a fronteira contrária à *inlet*, a *outflow*, são definidos como *outlets*. Definiram-se o número de células do domínio tendo

novamente como referência as recomendações da COST [47], onde o coeficiente de expansão geométrica entre células nunca pode ser superior a 1.2. Foi necessário utilizar este coeficiente porque o domínio em estudo tem uma ordem de grandeza de 3, comparativamente à ordem de grandeza 0 que a rede de células terá. Consequentemente usou-se uma rede de células muito refinada e regular na AI e progressivamente mais dispersa fora da AI (Figura 15 e Figura 16).

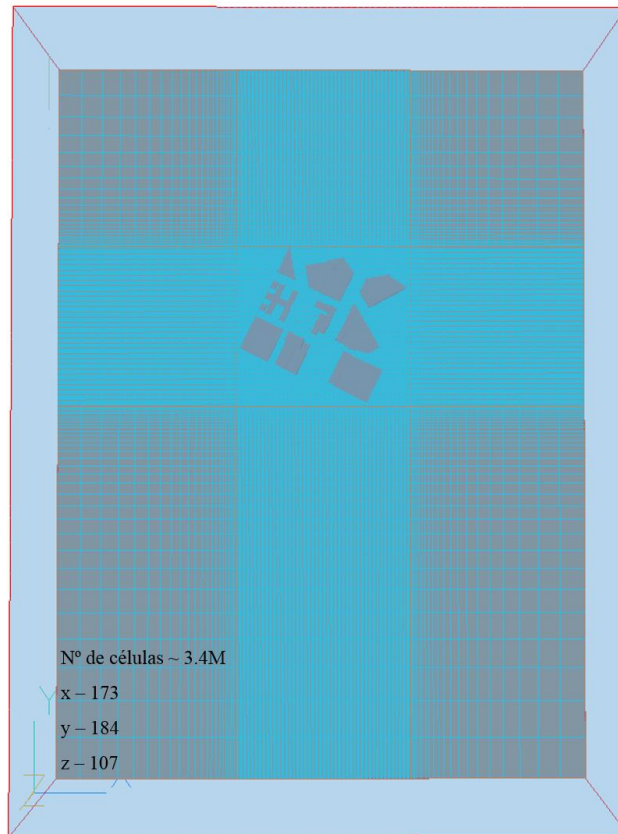


Figura 15 - Refinamento da rede de células computacional (Vista de Topo; Norte coincidente com o eixo y).

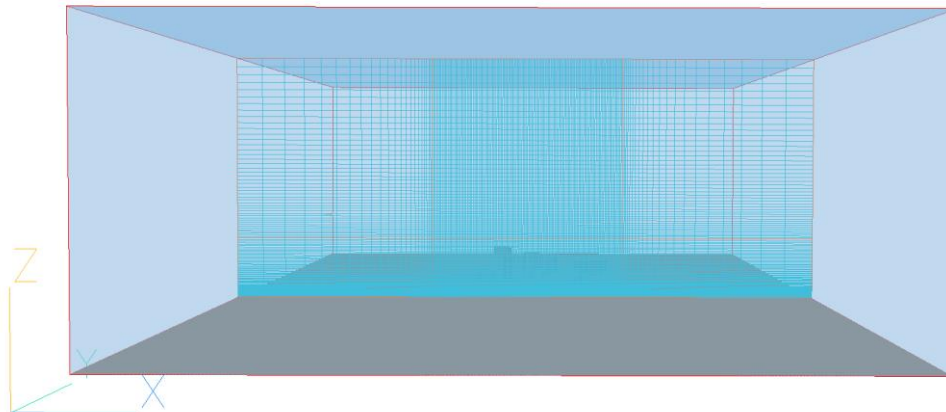


Figura 16 - Refinamento da rede de células computacional (Vista Frontal; Norte coincidente com o eixo y).

Para o registo das velocidades médias do vento nas 8 simulações utilizaram-se superfícies de controlo que foram alocadas perto das principais fachadas da torre e na zona do futuro jardim. Foram analisadas 3 alturas distintas das 6 principais fachadas da torre e ainda 5 zonas distintas do jardim, perfazendo um total de 23 superfícies de controlo. As superfícies presentes nas fachadas têm a altura de 4 m e estendem-se em cerca de 10 m, o equivalente à altura de um piso e ao comprimento de 2 escritórios. As superfícies que se encontram no jardim têm a altura de 2 m e 4 m de comprimento. As 3 alturas das fachadas analisadas correspondem exatamente ao 3º piso (Baixo), 0.5H (Meio) e penúltimo piso (Topo). Por último, as superfícies usadas no jardim foram colocadas no centro, Norte, Sul, Este e Oeste do mesmo (Figura 17).

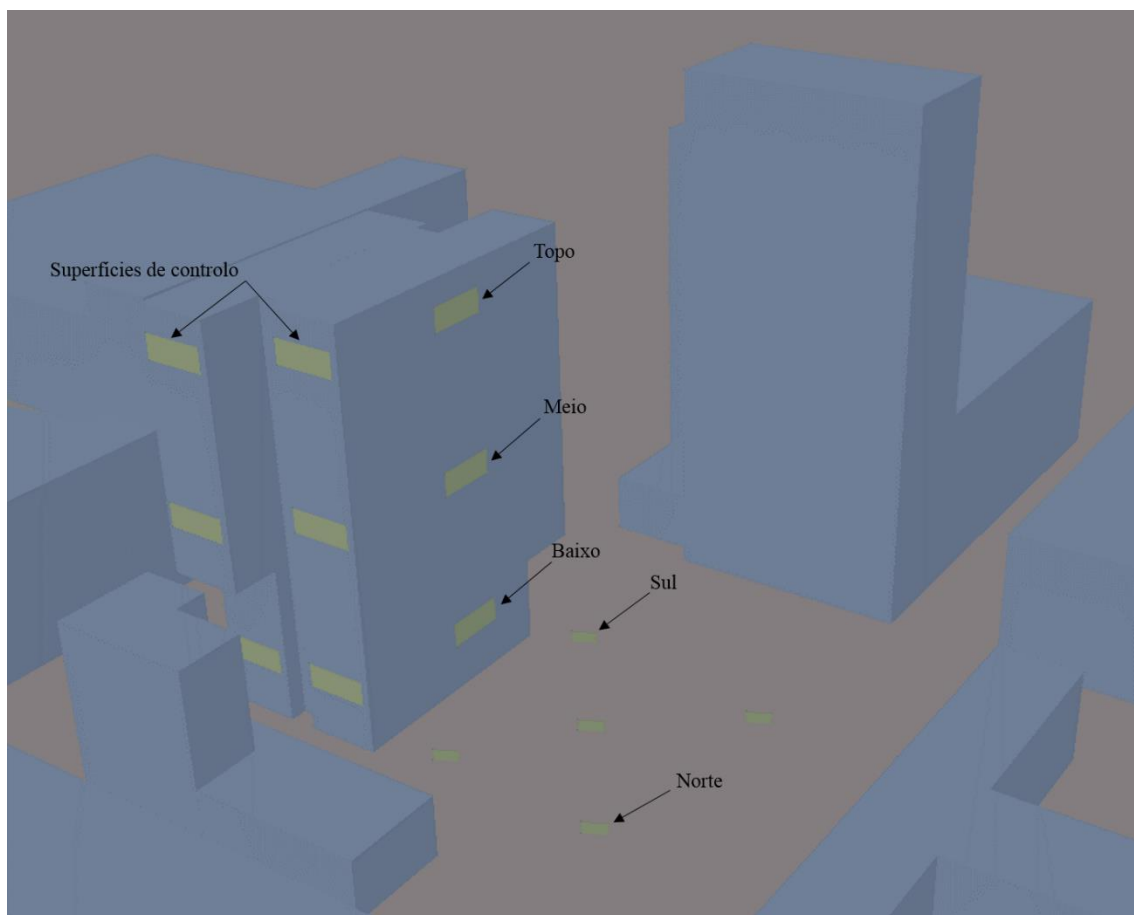


Figura 17 - Visualização em detalhe das superfícies de controlo usadas (Vista de Sul).

Depois dos resultados destas simulações foi necessário usar uma relação para o tratamento das velocidades registadas com as superfícies. Esta relação é um rácio entre a velocidade registada e a velocidade do vento de referência do *inlet* do domínio (10 m/s a 10 m de altura). Só é possível considerar esta relação porque os escoamentos tratados são claramente turbulentos devido às velocidades do vento e devido à escala do escoamento.

Este rácio determina que existe uma relação fixa entre a velocidade de dois pontos que é independente da velocidade do escoamento. Para cada superfície de controlo serão gerados 8 rácios, sendo que haverá um rácio para cada uma das direções de vento analisadas. Estes rácios permitirão modificar o ficheiro climático de Lisboa e corrigir as velocidades do vento do ficheiro consoante a direção de vento desse mesmo vento, usando-se para tal uma interpolação do rácio a ser utilizado. No final obtêm-se 23 ficheiros climáticos que contêm as velocidades médias de vento específicas de cada superfície de controlo ao longo de um ano típico.

Os 5 ficheiros climáticos obtidos para o jardim foram tratados seguindo uma metodologia semelhante à apresentada por Blocken et al. (2008), em que se aplica diretamente o regulamento holandês NEN 8100 (Figura 3) de avaliação do conforto térmico ao efeito do vento durante um ano [48]. Esta avaliação efetuou-se através do cálculo da probabilidade anual da velocidade do vento ser superior a 5 m/s e, consoante esse valor, foi atribuída uma classe de conforto de acordo com o tipo de atividade. Por fim, aplicou-se a mesma metodologia para uma velocidade de vento superior a 15 m/s, de onde é possível avaliar o efeito que grandes velocidades de vento têm nos pedestres.

Os restantes 18 ficheiros climáticos relativos à Torre da Cidade servirão de *input* ao próximo programa descrito, o *EnergyPlus*.

Tabela 1 - Resumo das Configurações Computacionais.

Domínio Computacional	1300 m (x) x 1750 m (y) x 540 m (z) Distância de: Topo – $6H_{máx}$, Lateral – $5H_{máx}$, <i>Inflow</i> : $5H_{máx}$, <i>Outflow</i> : $10H_{máx}$
Área de Interesse	410 m (x) x 375 m (y)
Altura da Torre da Cidade (H)	~ 70 m
Altura do maior edifício da AI ($H_{máx}$)	~ 90 m
Resolução Espacial da Rede	173x184x107 (~ 3.4 milhões de células)
Coefficiente de Expansão	1.2
Distribuição de Células	Progressão Geométrica (< 1.2)
Modelo de Turbulência	k-ε
Velocidade de Referência (m/s)	10
Altura de Referência	10 m
Perfil de Vento	Logarítmico
Orientações de Vento	N, NE, E, SE, S, SW, W, NW
Rácio de Obstrução	< 3%
Número de Iterações	5000

4.3. *EnergyPlus*

Depois de ter as informações da radiação incidente do AEA e de ter apresentado algumas propostas de melhoria, criar-se-ão vários cenários no *EnergyPlus* onde se demonstra o efeito dessas soluções na Torre da Cidade. Por outro lado, as simulações feitas no *PHOENICS* deram origem aos ficheiros climáticos que contêm as velocidades médias de vento interpoladas. Estas velocidades serão as variáveis de entrada dos modelos do *EnergyPlus* para o cálculo dos caudais de ventilação natural. São também testadas as soluções de melhoria apresentadas no estudo de radiação em AEA. Por último, avaliar-se-ão as necessidades de climatização nos diferentes cenários.

As simulações do comportamento térmico do edifício foram efetuadas com recurso a um modelo-tipo de 23.5 m² que é constituído por 3 zonas (Figura 18) [49]: área de escritório (19.5 m²), área de circulação interior (3 m²) e área de instalações sanitárias (1 m²). Estas áreas foram obtidas através do cálculo da proporção entre as áreas reais de projeto (Figura 4). O pé direito das três zonas é de 3 metros. Acrescentaram-se ainda elementos de

sombreamento com o formato em fole que simulam o sombreamento criado pelo piso superior e pelos escritórios imediatamente adjacentes.

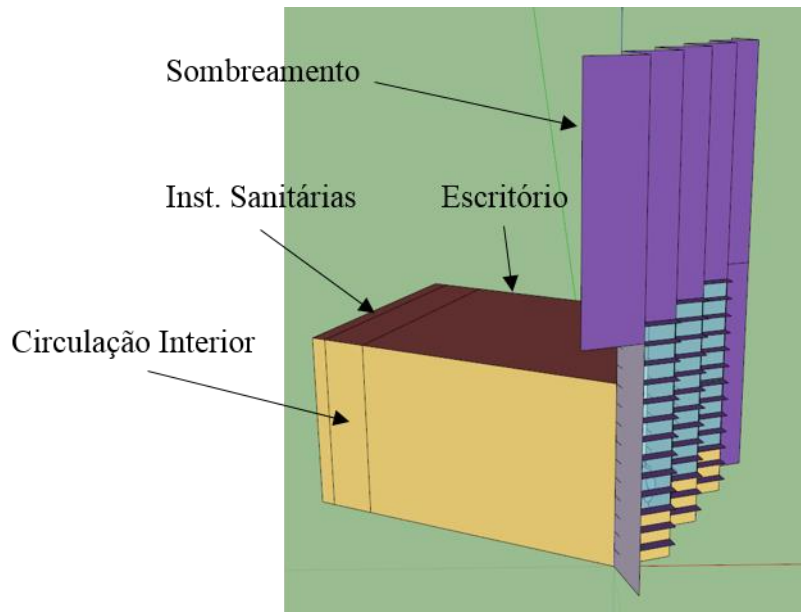


Figura 18 - Identificação das zonas do modelo (Vista de Sul).

Apenas a área de escritório tem trocas de calor diretamente com o exterior, através das superfícies constituintes do fole. Para as paredes laterais considerou-se como condição-fronteira exterior a sua parede oposta. Por exemplo, a parede Oeste do escritório tem como condição-fronteira exterior a sua parede Este. Este procedimento tem por objetivo considerar que o modelo-tipo tem como fronteira outros iguais a ele. De forma análoga, o mesmo método foi aplicado para o chão e teto das três zonas, assim como para as duas superfícies que dividem as mesmas (Figura 19).

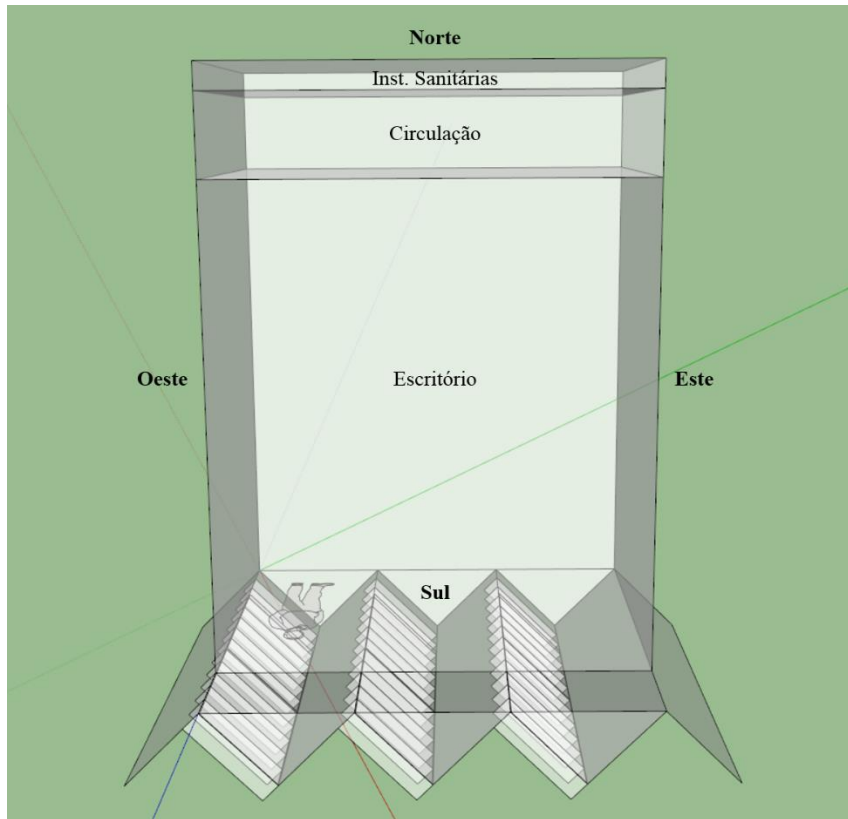


Figura 19 - Identificação das fronteiras do modelo e respetivas coordenadas internas (Vista de topo).

As coordenadas sugeridas pela figura anterior foram consideradas como coordenadas internas do próprio modelo, onde a fachada em fole está sempre orientada a Sul, independentemente da verdadeira orientação do modelo. Com base nesta simplificação obteve-se a seguinte tabela (Tabela 2):

Tabela 2 - Condições-fronteira exteriores para cada superfície do modelo.

Escritório		Circulação Interior		Inst. Sanitárias	
Superfície	Condição-fronteira	Superfície	Condição-fronteira	Superfície	Condição-fronteira
Fachada Sul (fole)	Exterior	Parede Sul	Parede Norte (Escritório)	Parede Sul	Parede Norte (Circulação)
Parede Oeste	Parede Este	Parede Oeste	Parede Este	Parede Oeste	Parede Este
Parede Este	Parede Oeste	Parede Este	Parede Oeste	Parede Este	Parede Oeste
Parede Norte	Parede Sul (Circulação)	Parede Norte	Parede Sul (Ins. Sanitárias)	Parede Norte	Adiabática
Teto	Chão	Teto	Chão	Teto	Chão
Chão	Teto	Chão	Teto	Chão	Teto

Assim, baseado no estudo efetuado no AEA, criaram-se 4 cenários no *EnergyPlus* que simulam a evolução do edifício ao longo deste trabalho. Assim, demonstrar-se-á qual o

resultado das soluções adotadas no consumo de energia elétrica que o edifício teria, referente à climatização, e a correspondente classe energética de acordo com o RECS. Prevê-se que as necessidades de climatização vão diminuindo com as melhorias implementadas nos diferentes cenários. Por outro lado, de forma a classificar energeticamente os 4 cenários segundo o RECS, criou-se um 5º modelo de referência por exigência do próprio regulamento. Esta referência apresenta soluções próprias para alguns dos elementos do modelo. Um resumo destes 5 modelos é apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 - Características dos 5 modelos estudados.

Modelo	Descrição
I	Fachada exterior do modelo totalmente constituída por vãos envidraçados.
II	Apenas 40% da fachada exterior é vão envidraçado, sendo o restante opaco.
III	Adição de sombreamento aos vãos envidraçados orientados a Sul.
IV	Adição do sistema de ventilação natural <i>single-sided</i> .
V	Modelo de referência definido no RECS.

Os cinco modelos acima mencionados foram definidos tendo por base as características que são apresentadas de seguida. A Tabela 4 resume o tipo de materiais que constituem todas as superfícies dos modelos, a sua condutividade térmica e espessura [50, 51, 52]. É importante referir que o *EnergyPlus* não considera a transferência de calor por pontes térmicas. Assim, os dados apresentados já contêm uma majoração de 35% no valor do coeficiente de transmissão térmica de todas as paredes exteriores do edifício [53].

Tabela 4 - Constituição das superfícies dos quatro modelos.

Superfície	Material	Espessura [m]	Condutividade	Resistência
			Térmica [W/m.K]	Térmica [m ² .K/ W]
Chão Falso	Betão	0.15	2.000	0.075
	Argamassa	0.02	1.800	0.011
	Caixa-de-ar	0.05	-	0.160
	Ladrilhos	0.02	0.600	0.033
Parede Interior de Pladur	Pladur	0.1	0.042	2.381
Viga da Área de Escritório	Betão	0.25	2.000	0.125
Parede Interior de Betão	Estuque	0.02	0.570	0.035
	Betão	0.25	2.000	0.125
	Estuque	0.02	0.570	0.035
Parede Exterior	Vidro	0.006	1.400	0.004
	Poliestireno Extrudido	0.036	0.030	1.167
	Vidro	0.006	1.400	0.004
	Betão	0.18	2.000	0.090
Teto Falso	Caixa-de-ar	0.50	-	0.160
	Gesso Cartonado	0.03	0.250	0.120

As características dos vidros utilizados nestes quatro modelos apresentam-se na seguinte tabela (Tabela 5) [54]:

Tabela 5 - Constituição do vidro duplo para o *EnergyPlus*.

Vidro Duplo	
Espessura [m]	0.027
Condutividade [W/m.K]	3
Transmissividade Solar	0.303
Refletividade Solar (frente)	0.309
Refletividade Solar (costas)	0.364
Transmissividade no visível	0.602
Refletividade no visível (frente)	0.154
Refletividade no visível (costas)	0.171
Transmissividade no infravermelho	0
Emissividade no infravermelho (frente)	0.84
Emissividade no infravermelho (costas)	0.84

Para simular o comportamento de um sistema AVAC que se pretende dimensionar, o *EnergyPlus* tem um objeto específico: *HVACTemplate:Zone:IdealLoadsAirSystem* (ILAS). O ILAS definiu-se como um sistema AVAC sem qualquer limitação de potência ou caudal. Deste modo, garante-se que, para cada iteração, o objeto usa o caudal e a potência necessários para cumprir as temperaturas de conforto. Além disto, o ILAS permite ainda definir o caudal mínimo de ar novo exigido no RECS. Perante este regulamento o sistema AVAC é de classe A, com um COP de 3.2 e um EER de 3.1.

A Tabela 6 representa os calendários que foram considerados para a ocupação, iluminação, equipamentos e para o sistema AVAC.

Tabela 6 - Horários de ocupação, de funcionamento da iluminação e equipamentos e de disponibilidade do sistema AVAC considerados no *EnergyPlus*.

Ocupação, Iluminação	Equipamentos	Sistema AVAC
2 ^a - 6 ^a	2 ^a - 6 ^a	2 ^a - 6 ^a
09h00 - 13h00	09h00 - 19h00	08h00 - 13h00
14h00 - 19h00		14h00 - 19h00

Para cada escritório definiram-se 3 ocupantes que têm um metabolismo de um tipo de atividade sedentário, correspondendo a 1.2 met. Como uma unidade de taxa de metabolismo dos ocupantes [met] é equivalente a 58.15 W/m² e a área de superfície exterior corporal é 1.81 m² (ocupante adulto com 70 kg de peso e 1.70 m de altura), obtém-se um valor aproximado de 120 W por ocupante [55]. Os ganhos provenientes dos equipamentos são 15 W/m² para os escritórios, sendo que este valor teve por base a utilização de um computador por ocupante (~ 100 W de ganhos térmicos) [56, 57]. Os valores de iluminação tiveram em consideração os requisitos da norma europeia de iluminação de espaços interiores e certificou-se que os valores máximos de densidade de potência de iluminação (DPI) não eram atingidos [58, 59]. Os valores de iluminação escolhidos tiveram como referência um catálogo de iluminação LED [60]. Os caudais de ar novo nas três zonas estudadas respeitam os caudais mínimos do RECS [61, 62]. As únicas zonas climatizadas são o escritório e o espaço de circulação interior. Como se espera que a Torre da Cidade seja um edifício híbrido nos termos do RECS, o sistema AVAC tem como temperaturas de *setpoint* o intervalo entre os 19°C e 27°C, de forma a garantir o conforto térmico interior [63]. Devido à composição dos sistemas de ventilação em todas as zonas, acrescentaram-se ganhos térmicos totalmente convectivos

correspondentes à perda de carga do ar insuflado. Estes ganhos foram adicionados a cada zona através do objeto *ElectricEquipment* [64] e o seu cálculo efetuou-se com base na seguinte equação:

$$P = \frac{\Delta p Q}{\eta} \quad (12)$$

onde:

P = Potência dissipada para as zonas [W];

Δp = Diferença de pressão [Pa];

Q = caudal mínimo de ar novo [m^3/s];

η = Eficiência de ventilação.

Considerando-se a diferença de pressão de 800 Pa, a eficiência de 0.8 e o caudal mínimo de ar novo, obtêm-se os valores de 20 W, 1.67 W e 0.56 W para o escritório, circulação interior e instalações sanitárias, respetivamente. Ainda na mesma ordem, tem-se a infiltração definida como 0.3 RPH, 0.2 RPH e 0.1 RPH. Abaixo é apresentada a Tabela 7 que resume os valores acima mencionados.

Tabela 7 - Valores atribuídos aos objetos constituintes dos modelos.

	Escritório	Circulação Interior	Instalações Sanitárias
Ocupantes	3 x 120 W	-	-
Iluminação	5 W/m ²	2 W/m ²	6 W/m ²
Equipamentos	15 W/m ² + 20 W	1.67 W	0.56 W
Infiltração	0.3 RPH	0.2 RPH	0.1 RPH
Caudais de Ar Novo	0.02 m ³ /s	0.00056 m ³ /s.m ²	0.00056 m ³ /s.m ²
Temperaturas de setpoint (AVAC)	19°C – 27°C	19°C – 27°C	-

Por último foi definido que o *timestep* da simulação seria de 10 minutos, perfazendo um total de 52 560 iterações representativas de um ano.

- **Modelo I – 100% Vãos Envidraçados**

Inicialmente criou-se um modelo onde as fachadas exteriores eram totalmente constituídas por vãos envidraçados, não considerando qualquer sombreamento afeto à fachada (Figura 20). Este modelo representa a primeira simulação feita no AEA, onde se avaliou a radiação incidente em todas as fachadas e sem quaisquer medidas de mitigação.

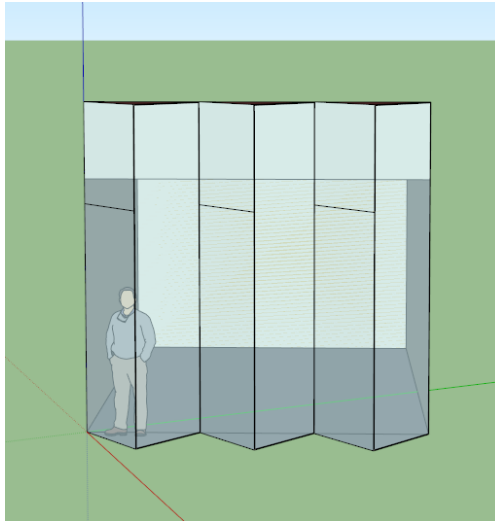


Figura 20 - Fachada com 100% de vãos envidraçados (Vista de SE).

- **Modelo II – 40% Vãos Envidraçados**

Para cada escritório considerou-se que uma das orientações do fole seria opaca, sendo escolhida a orientação com maior radiação incidente segundo o estudo de melhoria feito no AEA. Além disso, na outra orientação do fole considerou-se que, até aos 80 cm de altura, a fachada seria opaca, sendo o restante envidraçado (Figura 21).

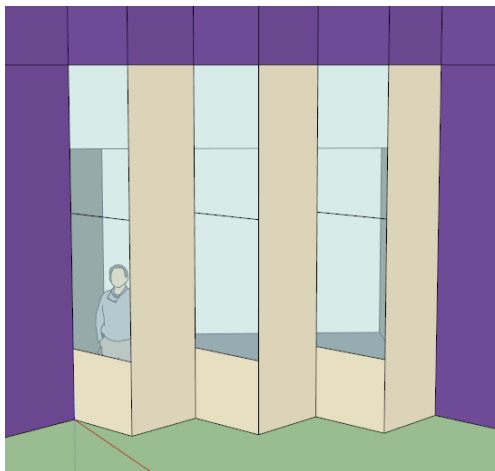


Figura 21 - Fachada com 40% de vãos envidraçados orientados a Sul (Vista de SE).

- **Modelo III – 40% Vãos Envidraçados + Sombreamento**

Este terceiro modelo é exatamente igual ao anterior mas com a adição de elementos de sombreamento. Estes têm as mesmas características do sombreamento aplicado no estudo de melhorias do AEA (Figura 22).

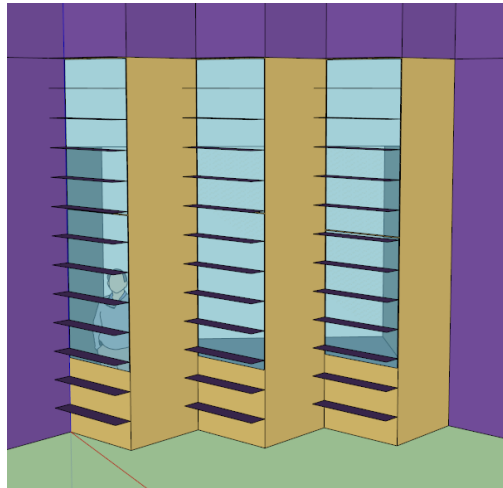


Figura 22 - Fachada com 40% de vãos envidraçados orientados a Sul com sombreamento (Vista de SE).

- **Modelo IV – 40% Vãos Envidraçados + Sombreamento + Ventilação Natural**

Neste último modelo acrescentou-se um sistema de ventilação natural que corresponde à abertura de uma das janelas oscilo-batentes com 1.5 m de altura. A área de secção da janela aberta é de 0,5 m². Este tipo de janelas é o mais recomendado para uma estratégia anual de ventilação natural, pois permite reduzir as velocidades de entrada do ar no Inverno, evitando que o mesmo entre diretamente na zona ocupada [65]. O objeto do *EnergyPlus* utilizado para simular ventilação natural numa estratégia *single-sided* foi o *ZoneVentilation:WindandStackOpenArea*, pois é função tanto do efeito da ação do vento como da impulsão térmica. A equação que calcula o caudal de ventilação natural por ação do vento é dada pela expressão:

$$Q_{\text{Vento}} = C_v A_{\text{Abertura}} F_{\text{Calendário}} V \quad (13)$$

onde:

Q_{Vento} = Caudal de ventilação natural por ação do vento [m³/s];

C_v = Abertura efetiva [Adimensional];

A_{Abertura} = Área de abertura da janela [m²];

$F_{\text{Calendário}}$ = Fração da área de abertura da janela, definida por calendário [Adimensional];

V = Velocidade de vento local [m/s].

Por outro lado, a equação que calcula o caudal de ventilação natural por efeito da impulsão térmica é dada pela expressão:

$$Q_{\text{Impulsão térmica}} = C_D A_{\text{Abertura}} F_{\text{Calendário}} \sqrt{2g\Delta H \left(\frac{|T_{\text{Zona}} - T_{\text{Exterior}}|}{T_{\text{Zona}}} \right)} \quad (14)$$

onde:

$Q_{\text{Impulsão térmica}}$ = Caudal de ventilação natural por impulsão térmica [m³/s];

C_D = Coeficiente de Descarga [Adimensional];

A_{Abertura} = Área de abertura da janela [m²];

$F_{\text{Calendário}}$ = Fração da área de abertura da janela, definida por calendário [Adimensional];

g = Aceleração da gravidade [m/s²];

ΔH = Altura desde a cota de abertura inferior até ao nível de pressão neutra [m];

T_{Zona} = Temperatura de bolbo seco do interior da zona [°C];

T_{Exterior} = Temperatura de bolbo seco do exterior [°C].

Por fim, o caudal de ventilação total é dado por:

$$Q_{\text{Ventilação Natural}} = \sqrt{Q_{\text{vento}}^2 + Q_{\text{impulsão térmica}}^2} \quad (15)$$

Um recente estudo sobre recomendações de ventilação natural obteve a seguinte equação empírica para o cálculo dos caudais de ventilação natural por efeito da ação do vento com a utilização de uma estratégia *single-sided* [66]:

$$Q_{\text{Vento}} = 0.1 A_{\text{Abertura}} U_L \quad (16)$$

onde:

U_L = Velocidade do vento local [m/s].

Para se obter uma igualdade entre as equações (16) e (13), necessita-se de manipular as variáveis da equação (13) para que coincidam com a equação (16). Assim, como $F_{\text{Calendário}}$

é uma variável partilhada tanto pelas equações (13) como (14), manipular-se-á a Abertura Efetiva, C_v , com o valor de 0.1. Os valores das restantes constantes são: $F_{\text{Calendário}} = 1$; $C_D = 0.3$; $\Delta H = 0.75$ m. Por fim, a variável V , que é igual a U_L , terá como valores as velocidades de vento do ficheiro climático gerado através do estudo de CFD.

O modo de funcionamento do sistema de ventilação natural é diferente para a estação de aquecimento e arrefecimento (Tabela 8). Considerou-se que a estação de aquecimento começa a 1 de Outubro e acaba a 30 de Março, enquanto a estação de arrefecimento começa a 1 de Abril e acaba a 30 de Setembro.

Tabela 8 - Disponibilidade anual do sistema de ventilação natural.

Sistema de Ventilação	
Natural	
Estação de	2 ^a - 6 ^a
Aquecimento	09h00 - 19h00
Estação de	Todos os dias
Arrefecimento	24h

De notar que a disponibilidade do sistema não significa que o mesmo esteja a funcionar. Para tal acontecer é preciso que a temperatura interior da zona não seja inferior a 21°C nem superior a 26.5°C e a temperatura do ar exterior não seja menor que 10°C nem superior a 26°C. Estes limites de temperaturas garantem que o sistema de ventilação natural e o sistema AVAC não funcionam ao mesmo tempo. Além disso, o limite de temperatura interior é fixado em 21°C para que não haja um desconforto no Inverno, com grandes amplitudes térmicas num curto espaço de tempo.

- **Modelo V – Referência**

Para a atribuição de uma classe energética segundo o regulamento português é exigida a criação de um modelo de referência com algumas características impostas pelo mesmo (Figura 23).

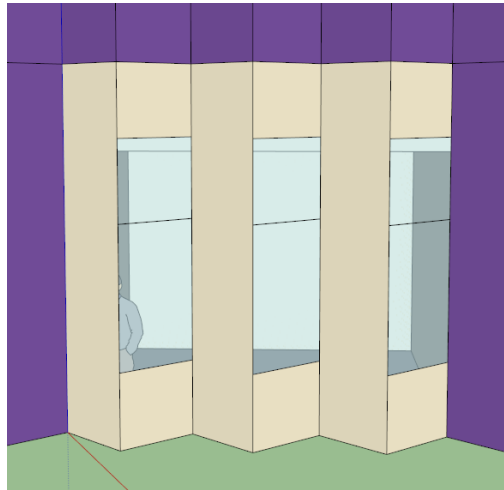


Figura 23 - Fachada com 30% de vãos envidraçados orientados a Este (Vista de SE).

A iluminação para o modelo de referência teve por base os já mencionados valores máximos de DPI permitidos no regulamento [67]. Os ganhos térmicos totalmente convectivos calcularam-se com base nos requisitos mínimos de eficiência para as unidades de tratamento de ar novo (UTAN), tendo uma classe de D/SFP 5 [68, 69]. Com uma eficiência de ventilação de 0.8 e com os caudais mínimos de ar novo para cada zona, resolveu-se a seguinte equação:

$$P = \frac{P_{SFP5} Q}{\eta} \quad (17)$$

onde:

P_{SFP5} = Potência Específica de classe D/SFP5 [W/(m³/s)].

As diferenças entre o modelo de referência e os restantes estão resumidas de seguida (Tabela 9) [70]:

Tabela 9 - Dados de referência por especificação do RECS.

Percentagem máxima de área do envidraçado	30 %
Temperaturas de <i>setpoint</i> (AVAC)	20°C – 25°C
Iluminação [W/m²]	14 (Escritórios), 4.5 (Circulação Interior), 9 (Inst. Sanitárias)
Equipamentos [W]	50 (Escritórios), 4.17 (Circulação Interior), 1.39 (Inst. Sanitárias)
Coefficiente de transmissão térmica da parede exterior [W/m.K]	0.7
Coefficiente de transmissão térmica dos vãos envidraçados exteriores [W/m.K]	4.3
Coefficiente de absorção da radiação solar das superfícies opacas	0.4
Fator solar dos vãos envidraçados	0.2
COP / EER	2.8 / 2.7

Para cada um dos 5 modelos anteriores prepararam-se 18 simulações em *EnergyPlus*, uma para cada superfície de controlo utilizada no estudo de CFD, contendo como *input* um ficheiro climático próprio com as velocidades locais. As variáveis de saída do *EnergyPlus* necessárias ao estudo foram: temperatura interior (3 zonas), temperatura exterior, caudal mínimo de ar novo (3 zonas), energia gasta em climatização (2 zonas) e energia gasta em iluminação (3 zonas).

Por fim, para obter uma classe energética, os resultados foram tratados da seguinte forma:

- Para incluir os efeitos das pontes térmicas lineares majorou-se em 5% as necessidades de aquecimento [kWh_t] para os primeiros 4 modelos [71];
- Converteu-se a energia térmica das necessidades de climatização (arrefecimento e aquecimento) para energia elétrica através da utilização dos COP e EER [kWh_e];
- Converteu-se a energia elétrica (energia final) das necessidades de climatização e da iluminação para energia equivalente de petróleo (energia primária) [kWh_{EP}] [72].

- A energia final de climatização e iluminação foi somada, dando origem aos indicadores $IEE_{pr,S}$ (Modelos I a IV) e $IEE_{ref,S}$ (Modelo V). Como não há produção de energia térmica ou elétrica através de fontes de energias renováveis, o indicador IEE_{REN} é nulo.
- Determinou-se o rácio de classe energética (R_{IEE}) para cada um dos 4 primeiros modelos através da equação (Equação 18) [73]:

$$R_{IEE} = \frac{IEE_{pr,S} - IEE_{REN}}{IEE_{ref,S}} \quad (18)$$

onde:

$IEE_{pr,S}$ = Indicador de Eficiência Energética previsto;

IEE_{REN} = Indicador de Eficiência Energética renovável, associado à produção de energia elétrica e térmica por fontes de energia renováveis;

$IEE_{ref,S}$ = Indicador de Eficiência Energética de referência;

- Por último, determinou-se a classe energética com recurso à seguinte tabela (Tabela 10) [74]:

Tabela 10 - Intervalos do valor de R_{IEE} para a determinação da classe energética.

Classe Energética	Valor de R_{IEE}
A +	$R_{IEE} \leq 0.25$
A	$0.26 \leq R_{IEE} \leq 0.50$
B	$0.51 \leq R_{IEE} \leq 0.75$
B -	$0.76 \leq R_{IEE} \leq 1.00$
C	$1.01 \leq R_{IEE} \leq 1.50$
D	$1.51 \leq R_{IEE} \leq 2.00$
E	$2.01 \leq R_{IEE} \leq 2.50$
F	$R_{IEE} \geq 2.51$

Para o dimensionamento do sistema AVAC foi utilizado o pior *timestep* do ano nos 18 casos estudados, ou seja, onde as necessidades de climatização foram maiores por um período de 10 minutos. Dado que os modelos usados foram apenas modelos-tipo, o dimensionamento efetuado usou dados normalizados, como sugere a equação (Equação 19):

$$P_{AVAC} = \frac{E_{timestep}}{\Delta t_{timestep} A_{modelo}} \quad (19)$$

onde:

P_{AVAC} – Potência do sistema de AVAC [W/m^2];

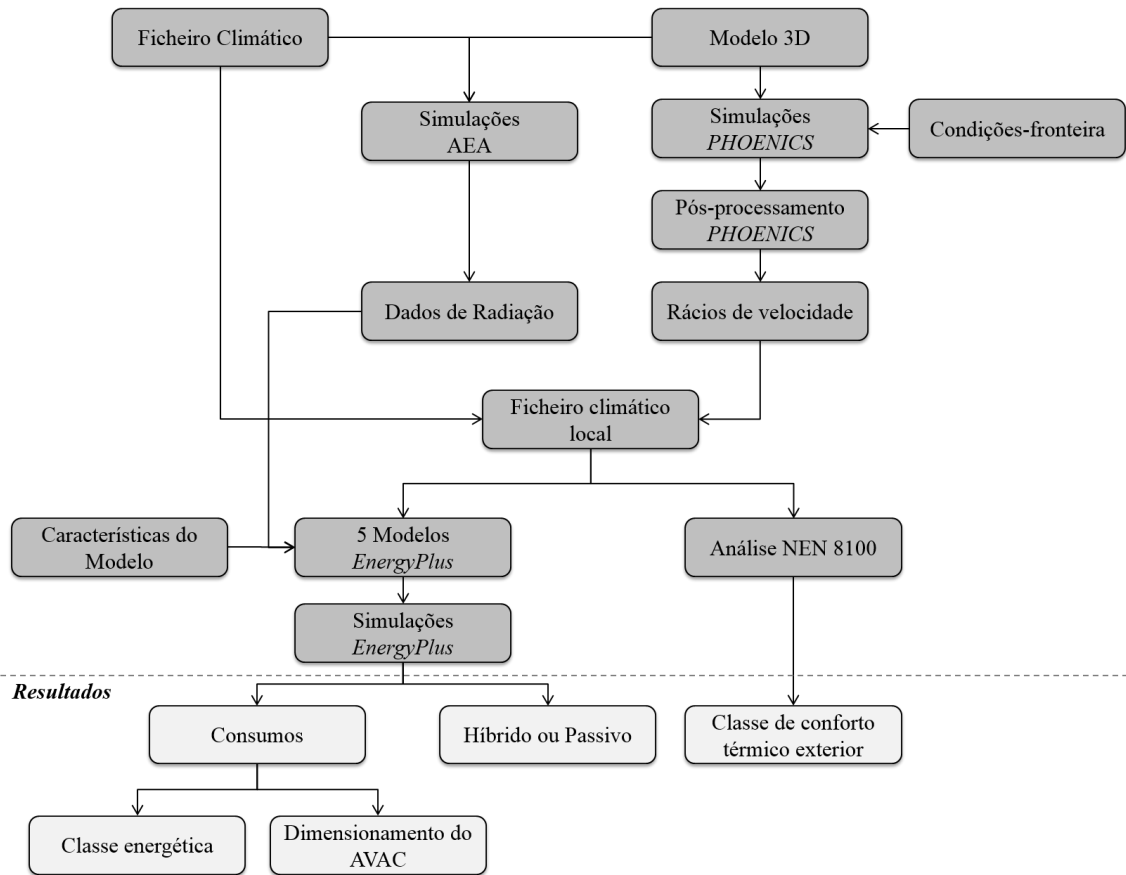
$E_{timestep}$ – Energia de climatização do pior *timestep* do ano [J];

Δt – Intervalo de tempo associado a cada iteração [s];

A_{modelo} – Área do modelo [m^2].

Foi ainda necessário classificar o edifício como sendo Híbrido ou Passivo, segundo o RECS [75]. Esta classificação foi efetuada com o cálculo da percentagem de funcionamento do sistema AVAC nas horas de ocupação do edifício.

Como panorama global deste trabalho é apresentado o esquema (Esquema 2) que traduz as interações dos três programas utilizados neste trabalho, referindo-se com detalhe os *inputs* e *outputs* de cada um deles. Por último, é feita ainda referência aos *outputs* finais da metodologia, que correspondem aos resultados desta dissertação.



Esquema 2 – Esquema detalhado da metodologia usada - Adaptado de Papadopoulos (2013) [76].

5. Resultados

Neste capítulo serão apresentados os resultados de acordo com a ordem já apresentada na metodologia. Contudo, somente são apresentados os resultados considerados relevantes, devido ao grande volume de dados.

5.1. Autodesk Ecotect Analysis

Para o estudo feito no AEA escolheram-se três resultados que refletem a diferença de radiação incidente consoante a orientação das fachadas (Figura 24, Figura 25, Figura 26). Todos os resultados aqui apresentados têm os valores de radiação incidente por metro quadrado [W/m^2] devidamente normalizados.

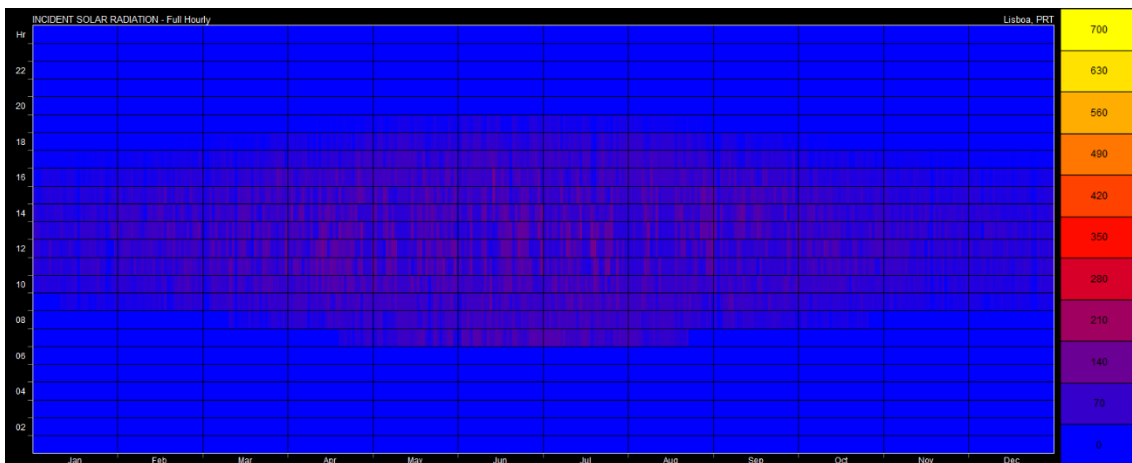


Figura 24 - Radiação incidente anual na fachada NE, com orientação N (Unidades: [W/m^2]).

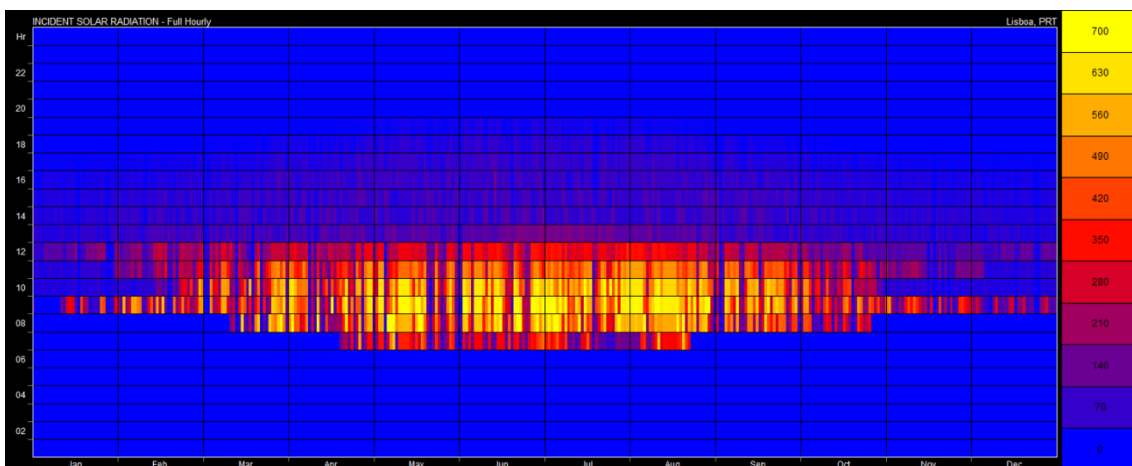


Figura 25 - Radiação incidente anual na fachada SE, com orientação E (Unidades: [W/m^2]).

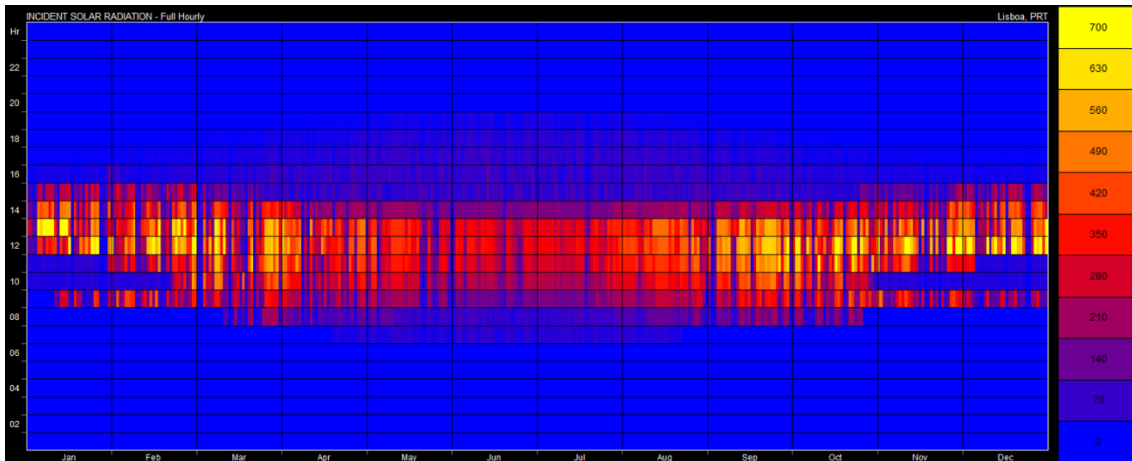


Figura 26 - Radiação incidente anual na fachada SE, com orientação S (Unidades: $[W/m^2]$).

Como se observa, a radiação incidente a Sul é muito elevada relativamente às restantes e representaria uma significativa quantidade de ganhos solares através dos vãos envidraçados. Assim, nas fachadas Sudoeste e Sudeste decidiu-se tornar opacas as orientações do fole a Oeste e Este, respetivamente. Embora nas orientações do fole a Sul a quantidade de radiação seja maior, estas são mais suscetíveis a uma boa estratégia de sombreamento sem alterar significativamente o formato exterior da fachada. A Figura 27 é o resultado da aplicação do sombreamento já referido na metodologia, denotando-se uma clara melhoria face à Figura 26, principalmente nos meses quentes de Verão.

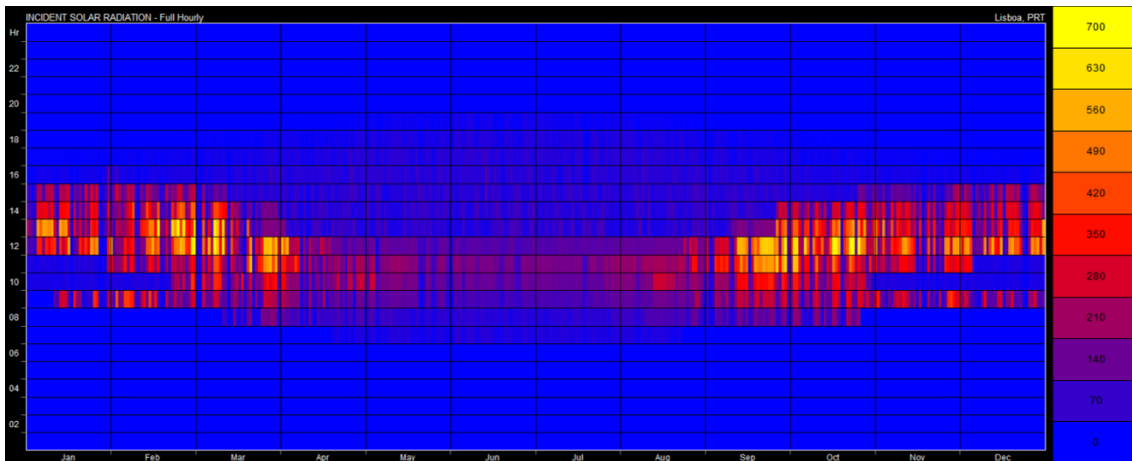


Figura 27 - Radiação incidente anual na fachada SE, com orientação S (Unidades: $[W/m^2]$).

O Gráfico 1 faz um resumo de todos os resultados obtidos para cada orientação do fole das fachadas, diferenciando-se as fachadas opacas dos vãos envidraçados.

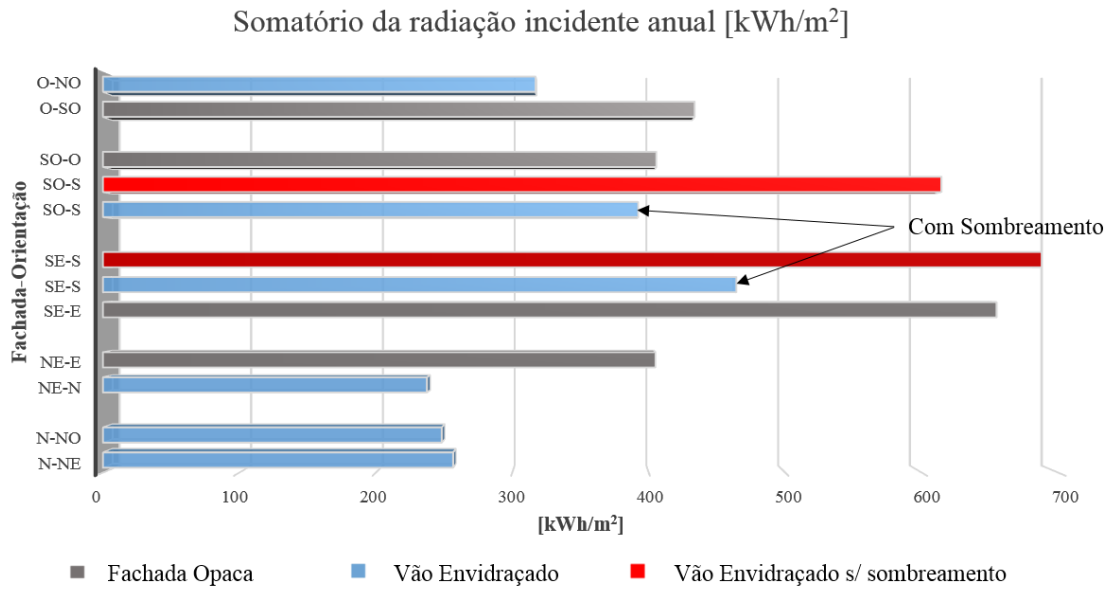


Gráfico 1 – Resumo do estudo do AEA para todas as orientações das principais fachadas.

5.2. PHOENICS

Seguidamente apresentam-se os resultados obtidos na simulação de CFD no programa *PHOENICS* para as velocidades de vento junto à Torre da Cidade e ao jardim. As Figuras Figura 28, Figura 29, Figura 30 e Figura 31 são o resultado da simulação feita com vento de Norte, tendo sido utilizada a própria ferramenta de visualização do *PHOENICS* para as obter.

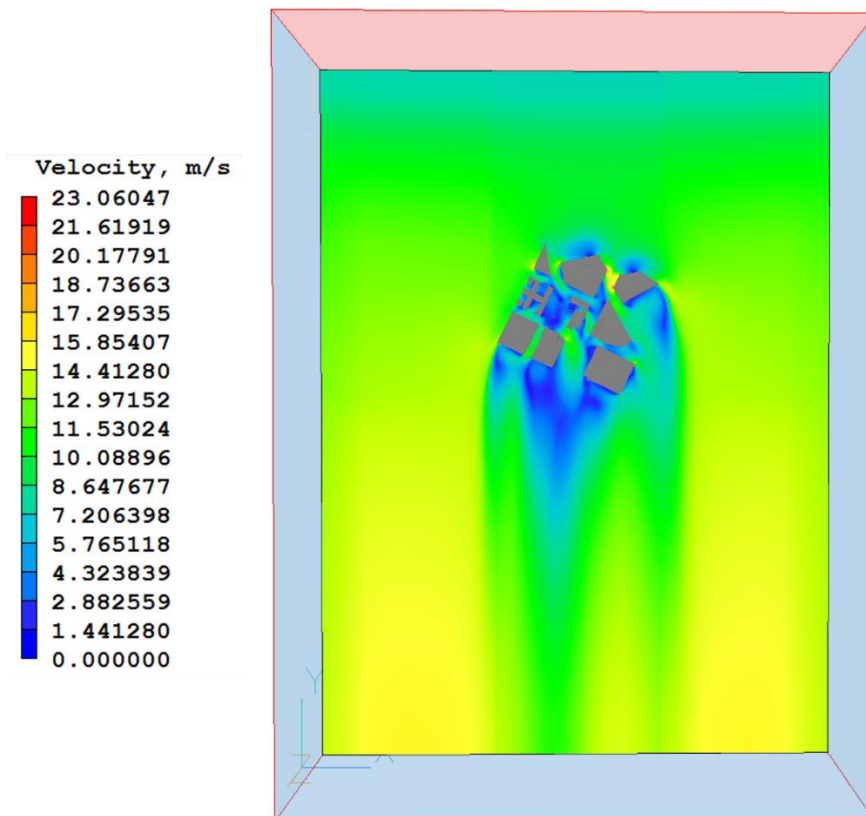


Figura 28 - Velocidades do vento em todo o domínio da simulação a 1.5 m de altura (Vista de topo, Norte coincide com Y).

Utilizando a mesma escala de velocidades, a Figura 29 é apresentada como uma ampliação da Figura 28 apenas para a AI.

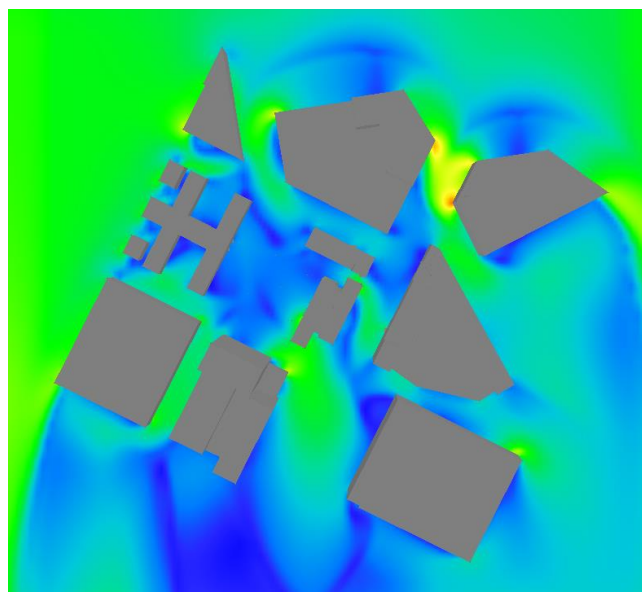


Figura 29 - Velocidades do vento na zona urbanizada a 1.5 m de altura (Vista de topo, Norte para cima).

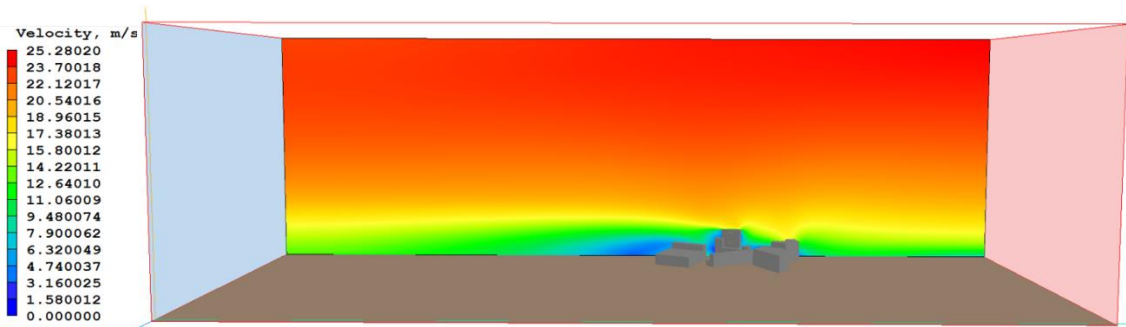


Figura 30 - Velocidades do vento em todo o domínio (Vista de Este).

Novamente, a Figura 31 é uma ampliação da AI da figura anterior, mantendo a mesma escala de velocidades.

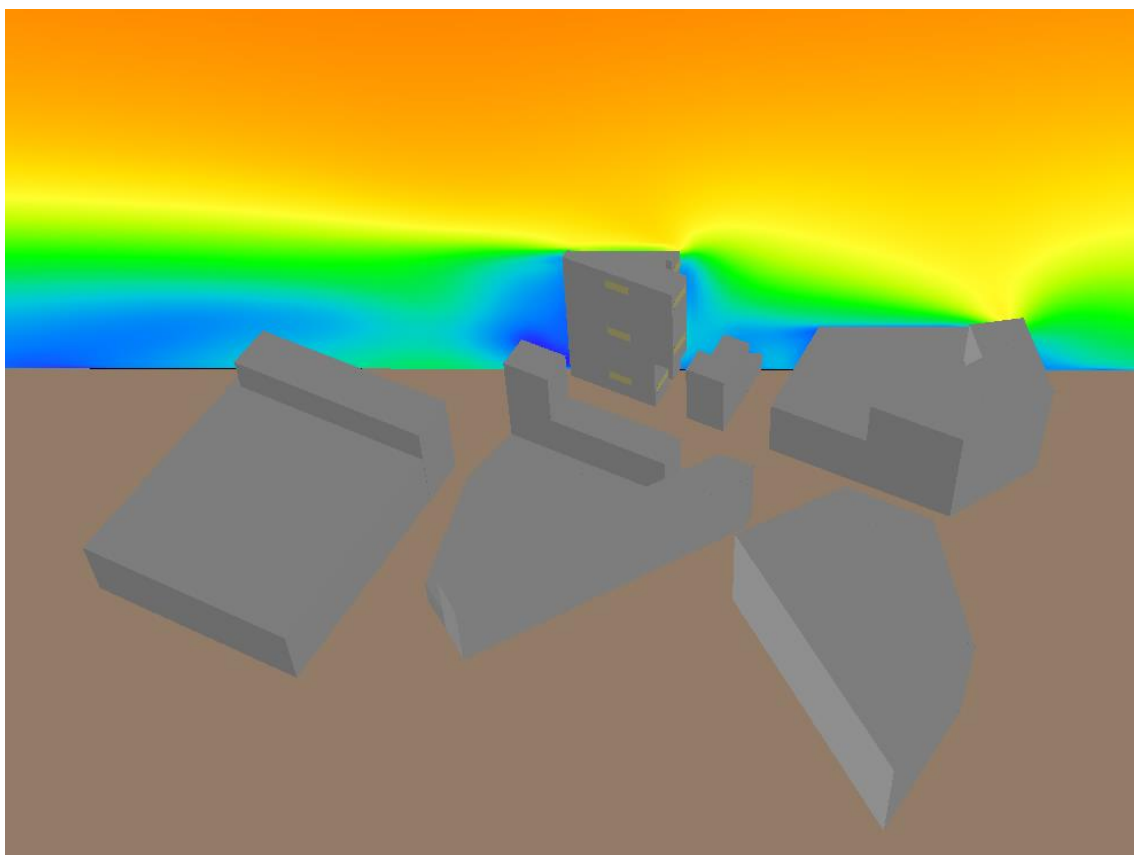


Figura 31 - Velocidades do vento junto da Torre da Cidade (Vista de Este).

Estas 4 figuras anteriores mostram que há uma redução significativa da velocidade do vento em zonas com pouco edificado e, em parte, protegidas pelas grandes edificações a montante, como o caso da zona do jardim. No entanto, em locais estreitos a velocidade do vento aumenta, dando-se o fenómeno de efeito de *Venturi* [77, 78]. A zona entre o Hotel Sheraton e a Torre da Cidade é um bom exemplo desse fenómeno. Na última

imagem é perceptível o efeito que os grandes edifícios têm no comportamento do vento imediatamente a jusante dos mesmos, onde a velocidade do vento é muito pequena.

De seguida são apresentadas duas tabelas que resumem os 144 rácios obtidos através da velocidade de referência e a velocidade registada nas 18 superfícies de controlo colocadas na Torre da Cidade. Estes rácios permitiram modificar o ficheiro climático de Lisboa com a velocidade local em cada superfície de controlo, servindo posteriormente como variável de entrada para o *EnergyPlus*. A localização das superfícies de controlo terá a seguinte denominação: “topo” para as que se localizam no penúltimo piso; “meio” para as que se localizam a metade da altura da torre; e “baixo” para as que se encontram no 3º piso (Tabela 11 e Tabela 12).

Tabela 11 - Rácios de velocidade em função da direção do vento (I).

		Orientação da Fachada								
		SE			SW			SW		
		Topo	Meio	Baixo	Topo	Meio	Baixo	Topo	Meio	Baixo
Direção do Vento	Norte	0.74	0.21	0.33	0.34	0.22	0.18	0.75	0.62	0.22
	Nordeste	1.12	0.75	0.45	0.29	0.30	0.13	0.22	0.28	0.06
	Este	0.75	0.80	0.67	0.58	0.32	0.27	0.93	0.61	0.07
	Sudeste	0.17	0.22	0.18	0.72	0.26	0.17	1.48	0.96	0.86
	Sul	1.51	1.40	1.38	0.59	0.28	0.37	1.22	1.13	0.44
	Sudoeste	0.58	0.66	0.63	0.20	0.26	0.34	0.23	0.29	0.15
	Oeste	0.43	0.32	0.36	0.31	0.45	0.23	1.43	1.28	0.30
	Noroeste	0.47	0.52	0.14	0.33	0.41	0.23	1.22	1.06	0.25

Tabela 12 - Rácios de velocidade em função da direção do vento (II).

		Orientação da Fachada								
		NW			NE			NE		
		Topo	Meio	Baixo	Topo	Meio	Baixo	Topo	Meio	Baixo
Direção do Vento	Norte	1.28	0.97	0.73	0.71	0.67	0.68	1.43	1.35	1.28
	Nordeste	0.24	0.32	0.19	0.58	0.64	0.50	0.73	0.49	0.28
	Este	0.29	0.29	0.18	0.88	0.58	0.71	1.59	1.01	0.60
	Sudeste	0.51	0.65	0.37	0.55	0.58	0.89	1.45	1.05	0.50
	Sul	0.25	0.52	0.35	0.37	0.26	0.33	0.57	0.76	0.91
	Sudoeste	0.27	0.58	0.62	0.21	0.28	0.16	0.22	0.31	0.33
	Oeste	0.91	0.58	0.59	0.87	0.68	1.09	1.48	1.37	1.03
	Noroeste	0.68	0.47	0.55	1.11	0.86	0.81	1.64	1.44	1.14

Contudo, há ainda 40 rácios relativos às superfícies de controlo localizadas no jardim (Tabela 13) que originaram 5 novos ficheiros climáticos e permitiram avaliar o conforto térmico exterior sob ação do vento.

Tabela 13 - Rácios de velocidade em função da direção do vento (III).

		Superfície de Controlo				
		Oeste	Sul	Norte	Este	Centro
Direção do Vento	Norte	0.27	0.72	0.29	0.17	0.33
	Nordeste	0.53	0.38	0.50	0.39	0.46
	Este	0.44	0.31	0.67	0.22	0.52
	Sudeste	1.66	2.02	0.93	0.45	0.37
	Sul	0.94	1.57	0.19	0.38	0.52
	Sudoeste	0.97	0.62	0.27	0.35	0.68
	Oeste	0.84	0.85	0.72	0.85	0.47
	Noroeste	0.36	0.72	0.42	0.52	0.34

A Tabela 14 apresenta os resultados da avaliação do conforto térmico exterior segundo os parâmetros da norma holandesa NEN 8100.

Tabela 14 - Avaliação do efeito do vento no conforto exterior sob ação do vento.

Superfície de Controlo	P(V>5m/s)	Classe	Tipo de Atividade			P(V>15m/s)
			Atravessar	Passear	Sentado	
Oeste	1.59%	A	Bom	Bom	Bom	0.00%
Sul	11.04%	D	Moderado	Fraco	Fraco	0.00%
Norte	0.74%	A	Bom	Bom	Bom	0.00%
Este	0.35%	A	Bom	Bom	Bom	0.00%
Centro	0.14%	A	Bom	Bom	Bom	0.00%

Em geral os resultados do conforto exterior para os pedestres são bastante positivos, com exceção na zona Sul do jardim, mais precisamente na zona entre a Torre da Cidade e o Hotel Sheraton. Esta possibilidade já tinha sido referida aquando da análise dos resultados de CFD para um vento de Norte. Assim, conclui-se que há efetivamente um constrangimento na passagem do vento na zona Sul do jardim ao nível dos pedestres. Isto dever-se-á à morfologia do edificado, dando-se o já acima mencionado efeito de Venturi.

5.3. EnergyPlus

Por fim, são apresentados os resultados das simulações feitas em *EnergyPlus*. O Gráfico 2 é o resumo dos consumos de eletricidade que os vários cenários apresentam.

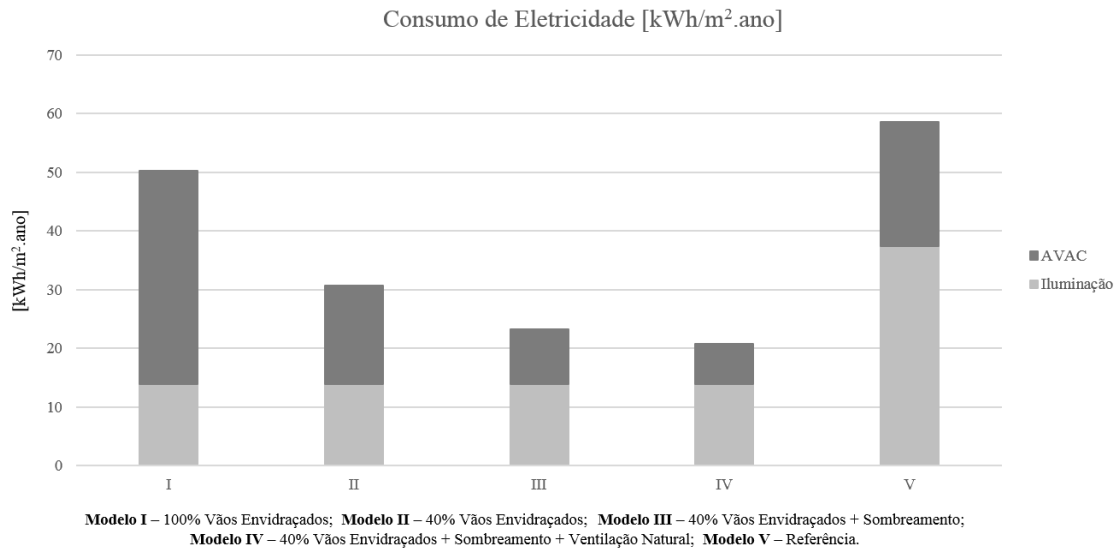


Gráfico 2 - Consumo elétrico dos cinco cenários estudados.

Como se observa, a referência (modelo V) é o pior cenário, muito devido ao elevado consumo de eletricidade para iluminação, pois o seu consumo em climatização é semelhante ao cenário com 40% de vãos envidraçados (modelo II). Os restantes quatro cenários (modelos I a IV) têm o mesmo consumo em iluminação e este é muito inferior ao da referência. Já era esperado que o cenário com 100% de vãos envidraçados (modelo I) apresenta-se um grande consumo em climatização, dado os elevados ganhos solares a que está sujeito. Ao se utilizar paredes opacas nas orientações já referidas no Gráfico 1 (modelo II), verifica-se que o consumo em climatização diminui aproximadamente 55% comparativamente ao modelo I. Com a introdução de sombreamento nos vãos envidraçados (modelo III) o consumo em climatização diminui aproximadamente 45% relativamente ao anterior. Por último, a utilização de uma estratégia de ventilação natural *single-sided* (modelo IV) resulta numa diminuição do consumo em climatização de aproximadamente 25% relativamente ao modelo III.

A tabela seguinte (Tabela 15) é referente à determinação da classe energética dos 4 cenários considerados para este estudo. A mesma apresenta os valores dos indicadores de eficiência energética, dos rácios de classe energética e das classes energéticas.

Tabela 15 - Classe energética dos quatro cenários considerados.

Modelos	V	I	II	III	IV
IEE	146	126	77	58	52
R_{IEE}	-	0.86	0.52	0.40	0.36
Classe	-	B-	B	A	A

Como já era esperado, a classe energética melhora consoante as soluções que se foram adotando ao longo deste trabalho. A melhor classe energética é para o cenário com ventilação natural (modelo IV) e obtém uma classificação de A segundo o RECS.

Os três gráficos (Gráfico 3, Gráfico 4 e Gráfico 5) demonstram o comportamento do modelo IV e a interação do sistema de ventilação natural com o sistema AVAC para 4 dias típicos de cada estação do ano. Não foram considerados fins-de-semana nem feriados e foi adotado apenas um gráfico para as estações Outono/Primavera.

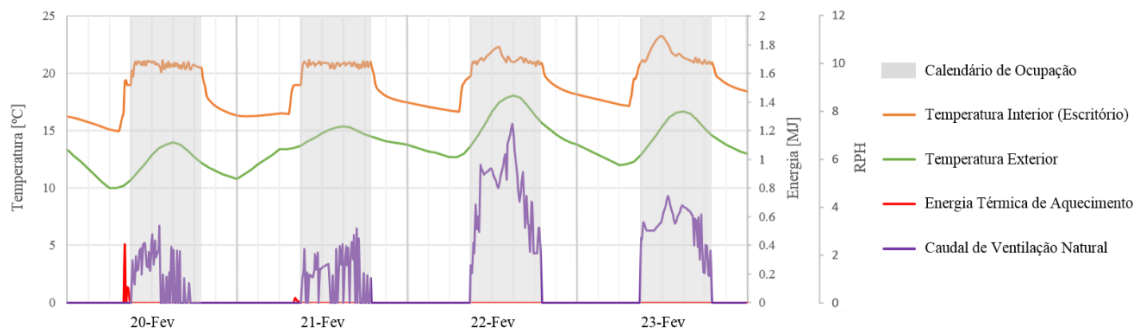


Gráfico 3 - Interação do sistema de ventilação natural no Inverno.

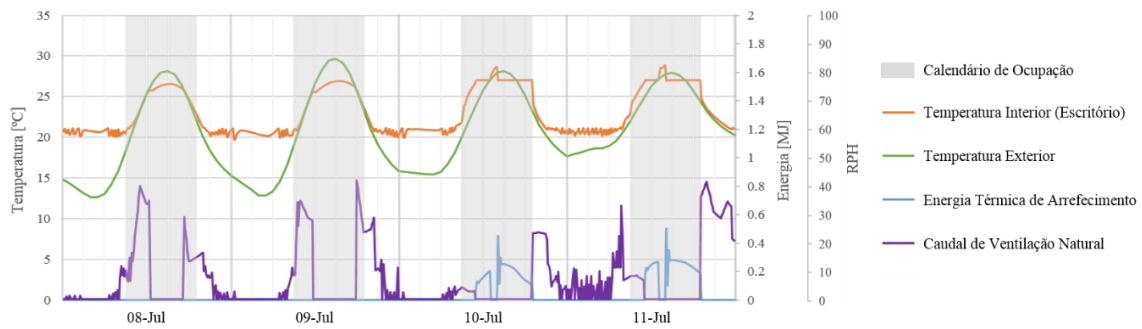


Gráfico 4 - Interação do sistema de ventilação natural no Verão.

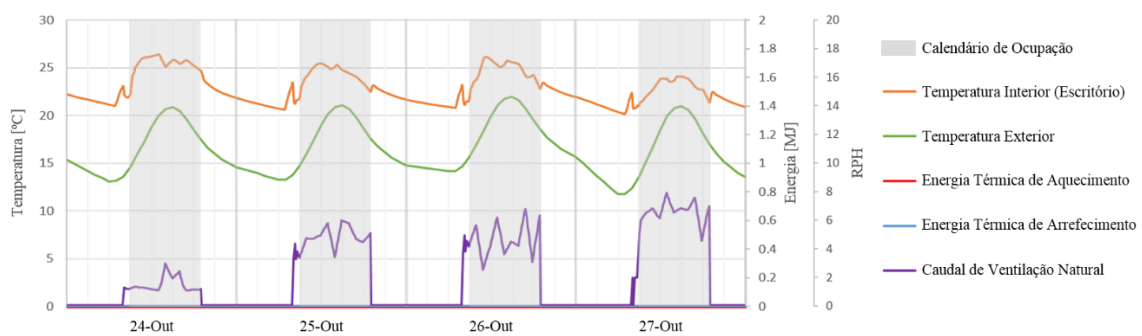


Gráfico 5 - Interação do sistema de ventilação natural no Outono/Primavera.

O dimensionamento para o sistema AVAC no pior *timestep* do ano é de 100 W/m^2 . Se se considerar que o sistema de AVAC abrange a totalidade da área útil da Torre da Cidade, o sistema AVAC terá uma capacidade total de, aproximadamente, 2 300 kW.

A Torre da Cidade apresenta uma percentagem de utilização do sistema AVAC nas horas de ocupação inferior a 25% para os 18 casos analisados, sendo assim designada de edifício híbrido [79].

6. Conclusão

Com a realização desta dissertação demonstrou-se a importância que os sistemas de ventilação natural podem ter no dimensionamento de sistemas de climatização para edifícios de escritórios em climas mediterrâneos temperados. Estes sistemas apresentaram uma melhoria significativa nos consumos de energia elétrica.

De seguida apresentam-se as respostas às questões de investigação:

- Qual o comportamento do sistema de ventilação natural durante o ano?

O sistema de ventilação natural apresenta dois tipos de comportamento. No Inverno, Primavera e Outono o sistema apresenta um funcionamento durante o dia, arrefecendo diretamente os escritórios com caudais à temperatura exterior. Durante o verão o sistema de ventilação natural apresenta uma estratégia de arrefecimento noturna, dadas as elevadas temperaturas registadas no exterior durante o dia.

- De que forma o uso do sistema de ventilação natural afeta o dimensionamento do sistema AVAC? E o consumo elétrico?

Uma vez que este dimensionamento é influenciado pela estação de aquecimento, onde os espaços são pré-aquecidos uma hora antes da hora de ocupação, o uso de ventilação natural em nada irá alterar este dimensionamento.

No referente ao consumo elétrico de climatização, este baixa 25% do modelo III (sem ventilação natural) para o modelo IV (com ventilação natural), tendo como valores 8.5 kWh/m² e 6.5 kWh/m², respetivamente. Anualmente, estima-se que se gaste cerca de 200 MWh em climatização para o modelo III e 150 MWh para o modelo IV.

- Qual o efeito do vento no conforto térmico exterior dos pedestres? Como garantir a fiabilidade dos resultados?

O efeito do vento no conforto térmico exterior dos pedestres foi avaliado segundo a NEN 8100 e apresentou como resultados a classe de conforto mais alto para 4 das 5 superfícies

de controlo utilizadas. A garantia de fiabilidade dos resultados foi atingida com a utilização de uma metodologia baseada na literatura existente sobre simulações de CFD em zonas urbanas.

- Caso o conforto exterior não seja atingido, que medidas se devem adotar?

A superfície Sul apresenta uma classe D, prejudicando o conforto térmico de um qualquer tipo de atividade estudado. Esta superfície demonstra que o escoamento é influenciado pelo efeito de Venturi originado pela localização da Torre da Cidade e do Hotel Sheraton. Contudo, esta classe poderá ser mitigada com a colocação de árvores na zona Norte e centro da praça [80].

Como limitações à realização deste trabalho são apresentados, consoante a ferramenta utilizada, os seguintes pontos:

- *PHOENICS*
 - Número de células limitadas, devido ao elevado tempo de computação das simulações;
 - Problemas de conversão de ficheiro CAD 3D para o *PHOENICS*;
 - Limitadas opções de desenho do modelo no próprio *PHOENICS*.
- *EnergyPlus*
 - A escolha dos materiais constituintes do modelo-tipo não são os definitivos.

Por último, são identificados os temas de desenvolvimento futuro que este trabalho terá. Perspetiva-se aumentar a complexidade das simulações CFD com a implementação de perfis topográficos a todo o domínio em estudo, acompanhada da colocação de novas superfícies de controlo entre a Torre da Cidade e o Hotel Sheraton, aumentando assim a zona de avaliação do conforto térmico exterior por ação do vento. A complexidade das simulações em *EnergyPlus* irá igualmente aumentar, com a utilização de um modelo que englobará todo um piso da Torre da Cidade. A isto soma-se a utilização de objetos que correspondem a equipamentos específicos de UTAN e ventilo-conectores e uma constituição das superfícies do modelo com os materiais finais de projeto.

7. Referências Bibliográficas

[1] Yi Jiang, Donald Alexander, Huw Jenkins, Rob Arthur, Qingyan Chen, Natural ventilation in buildings: measurement in a wind tunnel and numerical simulation with large-eddy simulation, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Volume 91, Issue 3, February 2003, Pages 331-353, ISSN 0167-6105, [http://dx.doi.org/10.1016/S0167-6105\(02\)00380-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0167-6105(02)00380-X).

[2] Notas em CFD, Equações de conservação, Acedido em: 11/Dezembro/2014.

<http://www.notasemcfd.com/2008/01/comeando-entender-o-mtodo-dos-volumes.html>

[3] CHAM, Documentation, Acedido em: 11/Dezembro/2014.

http://www.cham.co.uk/phoenics/d_polis/d_docs/tr001/tr001.htm

[4] CHAM, Documentation, Acedido em: 11/Dezembro/2014.

http://www.cham.co.uk/phoenics/d_polis/d_docs/tr001/tr001.htm

[5] Guilherme Carrilho da Graça, Nuno R. Martins, Cristina S. Horta, Thermal and airflow simulation of a naturally ventilated shopping mall, *Energy and Buildings*, Volume 50, July 2012, Pages 177-188, ISSN 0378-7788, <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.03.037>.

[6] *CFD Online*, Introduction to turbulence, Acedido em: 11/Dezembro/2014.

<http://www.cfd->

[online.com/Wiki/Introduction_to_turbulence/Turbulence_kinetic_energy](http://www.cfd-online.com/Wiki/Introduction_to_turbulence/Turbulence_kinetic_energy)

[7] Fernando Marques da Silva, *Aerodinâmica – Noções de Turbulência*, Lisboa, FCUL, 2013.

[8] Incropera, Frank P; Bergman, Theodore L; Lavine, Adrienne S; DeWitt, David P; *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, John Wiley & Sons, 2011.

[9] Frank Kreith, Raj M. Manglik, Mark S. Bohn, *Principles of Heat Transfer*, Seventh Edition, Cengage Learning, 2011.

[10] Incropera, Frank P; Bergman, Theodore L; Lavine, Adrienne S; DeWitt, David P; *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, John Wiley & Sons, 2011.

- [11] Incropera, Frank P; Bergman, Theodore L; Lavine, Adrienne S; DeWitt, David P; Fundamentals of Heat and Mass Transfer, John Wiley & Sons, 2011.
- [12] Frank Kreith, Raj M. Manglik, Mark S. Bohn, Principles of Heat Transfer, Seventh Edition, Cengage Learning, 2011.
- [13] Incropera, Frank P; Bergman, Theodore L; Lavine, Adrienne S; DeWitt, David P; Fundamentals of Heat and Mass Transfer, John Wiley & Sons, 2011.
- [14] Frank Kreith, Raj M. Manglik, Mark S. Bohn, Principles of Heat Transfer, Seventh Edition, Cengage Learning, 2011.
- [15] Nuno Mateus – Validação de modelos de simulação térmica num edifício de dupla pele sem climatização, Lisboa, 2012, página 4. Dissertação de Mestrado, Engenharia da Energia e do Ambiente.
- [16] Nuno M. Mateus, Armando Pinto, Guilherme Carrilho da Graça, Validation of EnergyPlus thermal simulation of a double skin naturally and mechanically ventilated test cell, Energy and Buildings, Volume 75, June 2014, Pages 511-522, ISSN 0378-7788, <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.02.043>.
- [17] Nuno M. Mateus, Guilherme Carrilho da Graça, A validated three-node model for displacement ventilation, Building and Environment, Volume 84, January 2015, Pages 50-59, ISSN 0360-1323, <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.10.029>.
- [18] Zhiqiang (John) Zhai, Mary-Hall Johnson, Moncef Krarti, Assessment of natural and hybrid ventilation models in whole-building energy simulations, Energy and Buildings, Volume 43, Issue 9, September 2011, Pages 2251-2261, ISSN 0378-7788, <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.06.026>.
- [19] Haojie Wang, Qingyan Chen, A semi-empirical model for studying the impact of thermal mass and cost-return analysis on mixed-mode ventilation in office buildings, Energy and Buildings, Volume 67, December 2013, Pages 267-274, ISSN 0378-7788, <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.08.025>.
- [20] Tobias Schulze, Ursula Eicker, Controlled natural ventilation for energy efficient buildings, Energy and Buildings, Volume 56, January 2013, Pages 221-232, ISSN 0378-7788, <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.07.044>.
- [21] Annamaria Belleri, Roberto Lollini, Spencer M. Dutton, Natural ventilation design: An analysis of predicted and measured performance, Building and Environment, Volume

81, November 2014, Pages 123-138, ISSN 0360-1323, <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.06.009>.

[22] ISO. International Standard 7730. ISO Geneva, revised 1990; 1984.

[23] Peter Höpfe, Different aspects of assessing indoor and outdoor thermal comfort, *Energy and Buildings*, Volume 34, Issue 6, July 2002, Pages 661-665, ISSN 0378-7788, [http://dx.doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00017-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00017-8).

[24] Ted Stathopoulos, Pedestrian level winds and outdoor human comfort, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Volume 94, Issue 11, November 2006, Pages 769-780, ISSN 0167-6105, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jweia.2006.06.011>.

[25] Peter Höpfe, Different aspects of assessing indoor and outdoor thermal comfort, *Energy and Buildings*, Volume 34, Issue 6, July 2002, Pages 661-665, ISSN 0378-7788, [http://dx.doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00017-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00017-8).

[26] Mohammad Taleghani, Laura Kleerekoper, Martin Tenpierik, Andy van den Dobbelen, Outdoor thermal comfort within five different urban forms in the Netherlands, *Building and Environment*, Volume 83, January 2015, Pages 65-78, ISSN 0360-1323, <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.03.014>.

[27] E. Andreou, Thermal comfort in outdoor spaces and urban canyon microclimate, *Renewable Energy*, Volume 55, July 2013, Pages 182-188, ISSN 0960-1481, <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2012.12.040>.

[28] Akashi Mochida, Isaac Y.F. Lun, Prediction of wind environment and thermal comfort at pedestrian level in urban area, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Volume 96, Issues 10–11, October–November 2008, Pages 1498-1527, ISSN 0167-6105, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jweia.2008.02.033>.

[29] Man Sing Wong, Janet E. Nichol, Pui Hang To, Jingzhi Wang, A simple method for designation of urban ventilation corridors and its application to urban heat island analysis, *Building and Environment*, Volume 45, Issue 8, August 2010, Pages 1880-1889, ISSN 0360-1323, <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.02.019>.

[30] Liang Chen, Edward Ng, Outdoor thermal comfort and outdoor activities: A review of research in the past decade, *Cities*, Volume 29, Issue 2, April 2012, Pages 118-125, ISSN 0264-2751, <http://dx.doi.org/10.1016/j.cities.2011.08.006>.

[31] Eddy Willemsen, Jacob A. Wisse, Design for wind comfort in The Netherlands: Procedures, criteria and open research issues, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Volume 95, Issues 9–11, October 2007, Pages 1541-1550, ISSN 0167-6105, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jweia.2007.02.006>.

[32] Peter Moonen, Thijs Defraeye, Viktor Dorer, Bert Blocken, Jan Carmeliet, Urban Physics: Effect of the micro-climate on comfort, health and energy demand, *Frontiers of Architectural Research*, Volume 1, Issue 3, September 2012, Pages 197-228, ISSN 2095-2635, <http://dx.doi.org/10.1016/j.foar.2012.05.002>.

[33] B. Blocken, T. Stathopoulos, CFD simulation of pedestrian-level wind conditions around buildings: Past achievements and prospects, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Volume 121, October 2013, Pages 138-145, ISSN 0167-6105, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jweia.2013.08.008>.

[34] W.D. Janssen, B. Blocken, T. van Hooff, Pedestrian wind comfort around buildings: Comparison of wind comfort criteria based on whole-flow field data for a complex case study, *Building and Environment*, Volume 59, January 2013, Pages 547-562, ISSN 0360-1323, <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.10.012>.

[35] B. Blocken, W.D. Janssen, T. van Hooff, CFD simulation for pedestrian wind comfort and wind safety in urban areas: General decision framework and case study for the Eindhoven University campus, *Environmental Modelling & Software*, Volume 30, April 2012, Pages 15-34, ISSN 1364-8152, <http://dx.doi.org/10.1016/j.envsoft.2011.11.009>.

[36] Peter Moonen, Thijs Defraeye, Viktor Dorer, Bert Blocken, Jan Carmeliet, Urban Physics: Effect of the micro-climate on comfort, health and energy demand, *Frontiers of Architectural Research*, Volume 1, Issue 3, September 2012, Pages 197-228, ISSN 2095-2635, <http://dx.doi.org/10.1016/j.foar.2012.05.002>.

[37] B. Blocken, J. Persoon, Pedestrian wind comfort around a large football stadium in an urban environment: CFD simulation, validation and application of the new Dutch wind nuisance standard, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Volume 97, Issues 5–6, August 2009, Pages 255-270, ISSN 0167-6105, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jweia.2009.06.007>.

[38] Eddy Willemsen, Jacob A. Wisse, Design for wind comfort in The Netherlands: Procedures, criteria and open research issues, *Journal of Wind Engineering and Industrial*

Aerodynamics, Volume 95, Issues 9–11, October 2007, Pages 1541-1550, ISSN 0167-6105, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jweia.2007.02.006>.

[39] Simone Ferrari, Valentina Zanutto, Office Buildings Cooling Need in the Italian Climatic Context: Assessing the Performances of Typical Envelopes, *Energy Procedia*, Volume 30, 2012, Pages 1099-1109, ISSN 1876-6102, <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2012.11.123>.

[40] *EnergyPlus*, Ficheiros Climáticos de Portugal, Acedido em: 11/Dezembro/2014.

http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/cfm/weather_data3.cfm/region=6_europe_wmo_region_6/country=PRT/cname=Portugal

[41] Yoshihide Tominaga, Akashi Mochida, Ryuichiro Yoshie, Hiroto Kataoka, Tsuyoshi Nozu, Masaru Yoshikawa, Taichi Shirasawa, AIJ guidelines for practical applications of CFD to pedestrian wind environment around buildings, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Volume 96, Issues 10–11, October–November 2008, Pages 1749-1761, ISSN 0167-6105, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jweia.2008.02.058>.

[42] Blocken B, Carmeliet J. 2008. Pedestrian wind conditions at outdoor platforms in a high-rise apartment building: generic sub-configuration validation, wind comfort assessment and uncertainty issues. *Wind and Structures* 11(1): 51-70.

[43] Franke, J., Hellsten, A., Schlünzen, H., Carissimo, B., 2007. Best practice guideline for the CFD simulation of flows in the urban environment. COST Action 732: Quality Assurance and Improvement of Microscale Meteorological Models.

[44] Bert Blocken, 50 years of Computational Wind Engineering: Past, present and future, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Volume 129, June 2014, Pages 69-102, ISSN 0167-6105, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jweia.2014.03.008>.

[45] Guilherme Carrilho da Graça, Nuno R. Martins, Cristina S. Horta, Thermal and airflow simulation of a naturally ventilated shopping mall, *Energy and Buildings*, Volume 50, July 2012, Pages 177-188, ISSN 0378-7788, <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.03.037>.

[46] Blocken B, Carmeliet J. 2008. Pedestrian wind conditions at outdoor platforms in a high-rise apartment building: generic sub-configuration validation, wind comfort assessment and uncertainty issues. *Wind and Structures* 11(1): 51-70.

- [47] Franke, J., Hellsten, A., Schlünzen, H., Carissimo, B., 2007. Best practice guideline for the CFD simulation of flows in the urban environment. COST Action 732: Quality Assurance and Improvement of Microscale Meteorological Models.
- [48] Blocken B, Carmeliet J. 2008. Pedestrian wind conditions at outdoor platforms in a high-rise apartment building: generic sub-configuration validation, wind comfort assessment and uncertainty issues. *Wind and Structures* 11(1): 51-70.
- [49] Portaria nº 349-D/2013, Anexo I – Tabela I.02. D.R. I Série. 233 (2013-12-02) 6628-(45). Ministérios do Ambiente, Ordenamento do Território e Energia, da Saúde e da Solidariedade, Emprego e Segurança Social.
- [50] Santos, C.A. Pina dos; Matias, L., Coeficientes de transmissão térmica de elementos da envolvente de edifícios – Versão atualizada 2006. LNEC, 2007. Informação Técnica Edifícios ITE 50.
- [51] Incropera, Frank P; Bergman, Theodore L; Lavine, Adrienne S; DeWitt, David P; *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, John Wiley & Sons, 2011.
- [52] The Engineering ToolBox (2014, 23 de Novembro). Thermal Conductivity of some common Materials and Gases [Online]. Disponível em: http://www.engineeringtoolbox.com/thermal-conductivity-d_429.html
- [53] Portaria nº 349-D/2013, Anexo I – Tabela I.04. D.R. I Série. 233 (2013-12-02) 6628-(47). Ministérios do Ambiente, Ordenamento do Território e Energia, da Saúde e da Solidariedade, Emprego e Segurança Social.
- [54] Nuno M. Mateus, Armando Pinto, Guilherme Carrilho da Graça, Validation of EnergyPlus thermal simulation of a double skin naturally and mechanically ventilated test cell, *Energy and Buildings*, Volume 75, June 2014, Pages 511-522, ISSN 0378-7788, <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.02.043>.
- [55] Portaria nº 353-A/2013. D.R. I Série. 235 (2013-12-04) 6644-(2-10). Ministérios do Ambiente, Ordenamento do Território e Energia, da Saúde e da Solidariedade, Emprego e Segurança Social.
- [56] Intel, Intel Core i5 3570k, Acedido em: 11/Dezembro/2014. <http://ark.intel.com/products/65520>

- [57] *Intel*, Thermal Design Power, Acedido em: 11/Dezembro/2014. <http://www.intel.com/content/dam/doc/white-paper/resources-xeon-measuring-processor-power-paper.pdf>
- [58] Portaria nº 349-D/2013, Anexo I – Tabela I.28. D.R. I Série. 233 (2013-12-02) 6628-(67). Ministérios do Ambiente, Ordenamento do Território e Energia, da Saúde e da Solidariedade, Emprego e Segurança Social.
- [59] EN 12464-1:2011, Light and lighting – Lighting of work places – Part 1: Indoor work places, BSI, ISBN 978 0 580 68495 1
- [60] Toshiba (2014, 23 de Novembro). Toshiba Lighting Systems – LED Product catalogue 04/2014 [Online]. Disponível em: https://www.toshiba.eu/lighting/service/product-catalogue/14-04/toshiba_lighting_product_catalogue_uk_0414.pdf
- [61] Portaria nº 353-A/2013, Anexo – Tabela I.04. D.R. I Série. 235 (2013-12-04) 6644-(6). Ministérios do Ambiente, Ordenamento do Território e Energia, da Saúde e da Solidariedade, Emprego e Segurança Social.
- [62] Portaria nº 353-A/2013, Anexo – pontos 2.3.1 – a) e 2.3.2. D.R. I Série. 235 (2013-12-04) 6644-(6). Ministérios do Ambiente, Ordenamento do Território e Energia, da Saúde e da Solidariedade, Emprego e Segurança Social.
- [63] Portaria nº 349-D/2013, Anexo I – ponto 5.3 – b). D.R. I Série. 233 (2013-12-02) 6628-(51). Ministérios do Ambiente, Ordenamento do Território e Energia, da Saúde e da Solidariedade, Emprego e Segurança Social.
- [64] ENERGYPLUS™, Input Output Reference - The Encyclopedic Reference to EnergyPlus Input and Output, 2013, pp. 365-366.
- [65] Per Heiselberg, Kjeld Svidt, Peter V. Nielsen, Characteristics of airflow from open windows, *Building and Environment*, Volume 36, Issue 7, August 2001, Pages 859-869, ISSN 0360-1323, [http://dx.doi.org/10.1016/S0360-1323\(01\)00012-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0360-1323(01)00012-9).
- [66] Switenki, Paul; Hovanec, Michael; Adams, Kyle; Carrilho da Graça, Guilherme. 2014. *Natural Ventilation Design Guidelines*. California Energy Commission.
- [67] Portaria nº 349-D/2013, Anexo I – Tabela I.28. D.R. I Série. 233 (2013-12-02) 6628-(67). Ministérios do Ambiente, Ordenamento do Território e Energia, da Saúde e da Solidariedade, Emprego e Segurança Social.

[68] Portaria nº 349-D/2013, Anexo I – Tabelas I.20 e I.21. D.R. I Série. 233 (2013-12-02) 6628-(59-60). Ministérios do Ambiente, Ordenamento do Território e Energia, da Saúde e da Solidariedade, Emprego e Segurança Social.

[69] EN 13779:2004, Ventilation for non-residential buildings – Performance requirements for ventilation and room-conditioning systems, Bruxelas, Comissão Europeia de Normalização (CEN).

[70] Portaria nº 349-D/2013, Anexo I – Tabela I.07. D.R. I Série. 233 (2013-12-02) 6628-(51). Ministérios do Ambiente, Ordenamento do Território e Energia, da Saúde e da Solidariedade, Emprego e Segurança Social.

[71] Portaria nº 349-D/2013, Anexo I – Tabela I.04. D.R. I Série. 233 (2013-12-02) 6628-(47). Ministérios do Ambiente, Ordenamento do Território e Energia, da Saúde e da Solidariedade, Emprego e Segurança Social.

[72] Despacho nº 15793-D/2013, ponto 1 – a). D.R. II Série. 234 (2013-12-03) 35088-(13). Ministérios do Ambiente, Ordenamento do Território e Energia, da Saúde e da Solidariedade, Emprego e Segurança Social.

[73] Despacho nº 15793-J/2013, ponto 1.2.1 e Tabela 02. D.R. II Série. 234 (2013-12-03) 35088-(55-56). Ministérios do Ambiente, Ordenamento do Território e Energia, da Saúde e da Solidariedade, Emprego e Segurança Social.

[74] Despacho nº 15793-J/2013, ponto 1.2.2 e Tabela 03. D.R. II Série. 234 (2013-12-03) 35088-(56-57). Ministérios do Ambiente, Ordenamento do Território e Energia, da Saúde e da Solidariedade, Emprego e Segurança Social.

[75] Portaria nº 349-D/2013, Anexo I – ponto 5.3 – b). D.R. I Série. 233 (2013-12-02) 6628-(51). Ministérios do Ambiente, Ordenamento do Território e Energia, da Saúde e da Solidariedade, Emprego e Segurança Social.

[76] Papadopoulos, Argyrios – Numerical analysis of wind energy potential in the urban environment of Eindhoven. Eindhoven, August 2013, page 40. Final master project, Building Physics and Services.

[77] Bert Blocken, Jan Carmeliet, Ted Stathopoulos, CFD evaluation of wind speed conditions in passages between parallel buildings – effect of wall-function roughness modifications for the atmospheric boundary layer flow, Journal of Wind Engineering and

Industrial Aerodynamics, Volume 95, Issues 9–11, October 2007, Pages 941-962, ISSN 0167-6105, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jweia.2007.01.013>.

[78] B. Blocken, T. van Hooff, L. Aanen, B. Bronsema, Computational analysis of the performance of a venturi-shaped roof for natural ventilation: Venturi-effect versus wind-blocking effect, *Computers & Fluids*, Volume 48, Issue 1, September 2011, Pages 202-213, ISSN 0045-7930, <http://dx.doi.org/10.1016/j.compfluid.2011.04.012>.

[79] Portaria nº 349-D/2013, Anexo I – ponto 5.3 – b). D.R. I Série. 233 (2013-12-02) 6628-(51). Ministérios do Ambiente, Ordenamento do Território e Energia, da Saúde e da Solidariedade, Emprego e Segurança Social.

[80] Akashi Mochida, Isaac Y.F. Lun, Prediction of wind environment and thermal comfort at pedestrian level in urban area, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Volume 96, Issues 10–11, October–November 2008, Pages 1498-1527, ISSN 0167-6105, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jweia.2008.02.033>.