



**JORGE MIGUEL
ALMEIDA AMORIM
RODRIGUES**

**ANÁLISE E PARAMETRIZAÇÃO DE ESTRATÉGIAS
FREE-COOLING NUM EDIFÍCIO**



Universidade de Aveiro Departamento de (designação do departamento)
2012

**JORGE MIGUEL
ALMEIDA AMORIM
RODRIGUES**

**ANÁLISE E PARAMETRIZAÇÃO DE ESTRATÉGIAS
FREE-COOLING NUM EDIFÍCIO**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação científica do Prof. Doutor Nelson Amadeu Dias Martins, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro.

Dedico este trabalho aos meus pais, pois sem eles nada disto seria possível.

O júri

Presidente

Prof. Doutora Mónica Sandra Abrantes de Oliveira Correia
Professora Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

Arguente

Prof. Doutor Romeu da Silva Vicente
Professora Auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro

Orientador

Prof. Doutor Nelson Amadeu Dias Martins
Professora Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

Agradecimentos

Gostaria de começar por agradecer ao meu orientador Prof. Doutor Nelson Amadeu Dias Martins, por todo o apoio, mas acima de tudo por não se ter esquecido de mim.

Agradeço também a todos os meus amigos que me ajudaram ao longo desta caminhada, principalmente ao João Dinis, por ter-me ajudado nas alturas que mais precisei.

Finalmente agradeço aos meus pais e ao meu irmão, por nunca desistirem de mim e pelo seu amor incondicional. Obrigado por tudo.

Palavras-chave

Eficiência energética, Arrefecimento gratuito, *DesignBuilder*

Resumo

Encontramo-nos neste momento numa crise, não apenas monetária ou social, mas também energética e ambiental. Com o consumo voraz dos nossos recursos naturais finitos surge a urgência de o controlar, explorando novas formas de utilizar do que dispomos mas de uma forma mais eficiente e sem pôr em causa o nível de vida que damos como adquirido. Neste enquadramento surge a eficiência energética de edifícios como uma disciplina emergente capaz de pelo menos reduzir o impacto que os edifícios têm no meio em que nos inserimos. Incluído na miríade de técnicas e metodologias passíveis de tornar um edifício energeticamente mais eficiente encontra-se o arrefecimento gratuito, que será objeto de estudo nesta tese. O arrefecimento gratuito consiste numa técnica de climatização que aproveita a temperatura do ar exterior, assim como algumas características construtivas dos edifícios, para, quando o ar exterior está mais fresco que o interior, arrefecer o edifício. Com o objetivo de medir o impacto que esta técnica tem num dado edifício, utilizou-se uma ferramenta de simulação dinâmica, o *Energy plus* através do interface de utilização *DesignBuilder*. Com este simularam-se variados tipos de edifício, em diferentes locais e com diferentes tipos de utilização para determinar qual o impacto que essas variáveis teriam nos resultados finais, i.e., nos benefícios resultantes do arrefecimento gratuito. Tendo-se determinado como variáveis essenciais na avaliação do processo em estudo, o clima, a inércia do edifício, o perfil de utilização do mesmo e a técnica de arrefecimento gratuito utilizada, quantificou-se a tendência esperada para obter melhores resultados em locais mais quentes e quando o edifício detém uma ocupação anual sem grandes flutuações, assim como a influência das variáveis acima referidas no potencial de arrefecimento gratuito do edifício.

Keywords

Energy efficiency, Free cooling, *DesignBuilder*

Abstract

We find ourselves in a moment of crisis, one not only of a monetary or social degree, but also one of energy and environment. With the voracious consumption of our finite natural resources there comes an urgency to control it, exploring new ways to use what we have, but in a more efficient way without compromising our standard of life that we take for granted.

In this context arises the energy efficiency of buildings as an emerging discipline capable of at least reduce the impact that buildings have on the environment in which we operate. From the myriad of techniques and methodologies comes free cooling, which will be studied in this thesis.

Free cooling consists in an air conditioning technique that takes advantage of the outside air's temperature, as well as the building's design characteristics, to, when the outside air is cooler than on the inside, cool the building. With the objective of measuring the impact that technology has on a building, it was used a dynamic simulation tool, *EnergyPlus* through the interface of *DesignBuilder*. With it, we simulated several types of building, in different locations, to determine what would be the impact of these different variables on the final outputs, e.g., on the benefits of free cooling.

Having determined as key variables, the climate, the building's inertia, the type of use the building would have and the free cooling technique, it was quantified the expected trend to get better results in hotter locations and when the building has an annual occupation without major fluctuations, as well as the influence of the above mentioned variables on the potential for free cooling in the building.

Índice

Índice de figuras.....	III
Índice de tabelas	V
Índice de gráficos.....	VI
Lista de siglas	VIII
1. Introdução.....	1
1.1. Sumário.....	1
1.2. Enquadramento.....	1
1.2.1. A importância do aquecimento global	2
1.3. Objetivos	4
1.4. Revisão bibliográfica	5
1.4.1. Arrefecimento gratuito.....	5
1.4.2. Técnicas de arrefecimento gratuito.....	6
1.4.2.1. Ventilação de conforto diurna	6
1.4.2.2 Ventilação noturna	6
1.4.2.3 Arrefecimento radiativo.....	7
1.4.2.5 Arrefecimento evaporativo.....	8
1.4.2.5 Geotermia	10
1.4.3 Técnicas de arrefecimento passivo.....	10
1.4.3.1 Arrefecimento passivo.....	10
1.4.3.2 Eficiência energética em edifícios.....	11
1.4.3.3 Coberturas ajardinadas	12
1.4.3.4 Paisagismo	13
1.4.4 Normalização e regulamentação	14
1.4.5 Dimensionamento e simulação de sistemas	15
1.4.5.1 Dimensionamento	15
1.4.5.2 Sistema de arrefecimento gratuito.....	16
1.4.6 Análise económica.....	23
1.5 Contributo do trabalho desenvolvido	23
1.6 Organização da dissertação	23
1.7 Resumo.....	24
2. Formulação do problema e metodologia de análise	25
2.1. Sumário.....	25
2.1 Intervalo do arrefecimento gratuito - modelo matemático	25
2.2.1 Zona de conforto térmico.....	25
2.2.2 Equilíbrio térmico e temperatura interior sem sistema AVAC	27

2.3	Técnicas de arrefecimento gratuito passível de análise.....	29
2.4	Simulação do sistema AVAC.....	29
2.4.1	Modelo do edifício.....	30
2.4.2	Atividade – <i>Activity</i>	31
2.4.3	Aberturas – <i>Openings</i>	33
2.4.5	Iluminação – <i>Lighting</i>	35
2.4.6	AVAC.....	36
2.5	Metodologia de análise.....	41
2.6	Resumo.....	42
3.	Quantificação do potencial associado.....	43
3.4.6	Sumário.....	43
3.2	Variáveis e indicadores de desempenho relevantes.....	43
3.2.1	Variáveis de entrada.....	43
3.2.2	Necessidades de arrefecimento.....	45
3.3	Análise paramétrica.....	47
3.3.1	Cálculo da inércia.....	47
3.3.2	Carga interna.....	52
3.4	Resumo.....	53
4.	Análise de resultados.....	54
4.1	Sumário.....	54
4.2	Resultados por técnica de arrefecimento gratuito.....	54
4.2.1	Arrefecimento gratuito por tipo de sensor.....	54
4.2.2	Arrefecimento gratuito por ventilação noturna.....	56
4.3	Comparação de resultados.....	57
4.3.1	Localidade e perfil de utilização.....	57
4.3.2	Inércia.....	58
4.3.3	Técnica de arrefecimento gratuito.....	60
4.4	Resumo.....	69
5.	Caso de estudo.....	70
5.1	Sumário.....	70
5.3	Análise e comparação de resultados.....	70
5.3	Resumo.....	75
6.	Conclusões.....	76
6.1	Sumário.....	76
6.2	Conclusões gerais.....	76
6.3	Trabalhos futuros.....	77
7.	Bibliografia.....	78

Índice de figuras

Figura 1 – A produção de energia envolve a maior emissão de gases de efeito de estufa (31.1%), aparecendo o sector residencial em terceiro, depois dos transportes com 14.5% do total de gases libertados na atmosfera.....	3
Figura 2 – Evolução dos níveis de CO ₂ (concentração em partes por milhão) desde a década de 50. Todos os anos há um declínio temporário na curva: sempre que é Primavera e Verão no Hemisfério Norte, o CO ₂ decresce devido à vegetação que absorve o gás.	4
Figura 3 - Sistema <i>roof pond</i> . <i>Acima</i> – os painéis são mantidos fechados durante o dia. <i>Abaixo</i> – os painéis são abertos depois do pôr-do-sol, libertando todo o calor absorvido durante o dia.	7
Figura 4 - O ar mais seco vindo do exterior (1) é forçado pela ventilação (5) a passar por um bloco húmido (2), mantido por um reservatório de água (3). À medida que a humidade é captada o calor do ar é absorvido pela água (4), resultando num ar mais fresco (6).....	Erro!
Marcador não definido.	
Figura 5 - Arrefecimento por convecção e radiação podem ser integrados em conjunto para aumentar a capacidade de arrefecimento.....	Erro! Marcador não definido.
Figura 6 – Diversas fases de um lago ao longo do ano. A mistura acontecerá quando a densidade da água é mais ou menos uniforme, fazendo com que a temperatura também o seja independentemente da profundidade, já a estratificação irá “separar” a água.	10
Figura 7 - A utilização de coberturas ajardinadas não é algo de recente, aliás estas têm sido usadas desde 500 a.C. com os lendários jardins suspensos da Babilónia.	12
Figura 8 - No Verão, árvores altas plantadas perto da habitação dão sombreamento ao telhado enquanto árvores mais baixas e largas colocadas a oeste bloqueiam o sol da tarde. Árvores a noroeste escudam a casa dos ventos predominantes durante o Inverno.	13
Figura 9 – Esquema de um sistema de arrefecimento gratuito.....	17
Figura 10 - Exemplo de gráfico de outputs do <i>DesignBuilder</i>	18
Figura 11 - Interface do HAP.....	19
Figura 12 - Interface do <i>Building Wizard</i>	19
Figura 13 - Interface do TRNSYS.	20
Figura 14 - O <i>TRNSYS3D</i> permite a criação do modelo do edifício, enquanto o <i>TRNBuild</i> define propriedades mais específicas dos materiais de construção assim como ganhos diversos.	21
Figura 15 - Gama de conforto para ar condicionado e ventilação natural: a) Ar condicionado; b) Intervalo de conforto ASHRAE; c) Ventilação natural com limites de aceitação de 90%; d) Ventilação natural com limites de aceitação de 80%.	26
Figura 16 - Intervalos para aquecimento, arrefecimento gratuito e ventilação mecânica quando a temperatura “livre” é (a) mais alta e (b) mais baixa que a temperatura exterior.....	29
Figura 17 - Edifício simulado, visto aqui renderizado no <i>DesignBuilder</i>	30
Figura 18 - Edifício visto como visto no <i>DesignBuilder</i> (<i>layout</i>). <i>Acima</i> - Lado Norte (ver canto inferior esquerdo), com uma porta, e o lado Este. <i>Abaixo</i> - Lados Sul e Oeste do edifício, ambos com uma janela ao longo do comprimento da parede.	31
Figura 19 - <i>Activity</i> como visto no <i>DesignBuilder</i>	32
Figura 20 - <i>Openings</i> como visto no <i>DesignBuilder</i>	33
Figura 21 - <i>Lighting</i> como visto no <i>DesignBuilder</i>	35
Figura 22 - <i>HVAC</i> como visto no <i>DesignBuilder</i>	36

Figura 23 - Tabela de valores de caudais mínimos de ar novo retirada diretamente do RSECE.	37
Figura 24 - HVAC como visto no <i>DesignBuilder</i> , com especial destaque no <i>Heat Recovery</i>	39
Figura 25 - Opções do sistema de arrefecimento gratuito como visto no HVAC do <i>DesignBuilder</i>	40
Figura 26 - Esquema da metodologia usada para as simulações no <i>DesignBuilder</i> . Para a simulação do sistema de ventilação noturna o esquema será semelhante, retirando apenas o tipo de sensor utilizado.	41
Figura 27 - Portugal com as zonas climáticas de Inverno à esquerda e de Verão à direita..	44
Figura 28 - Materiais usados na parede como visto no <i>DesignBuilder</i> : isolamento na parte externa, depois tijolo e reboco na parte mais interior.....	47
Figura 29 - Materiais usados na cobertura do edifício, como visto no <i>DesignBuilder</i> . De fora para dentro: gravilha, isolamento EPS, betão armado e reboco na parte mais interior.....	48
Figura 30 - Pavimento de betão como visto no <i>DesignBuilder</i>	48
Figura 31 - Edifício renderizado no <i>DesignBuilder</i> , o círculo no canto inferior esquerdo indica o norte.....	70

Índice de tabelas

Tabela 1 - Lista de <i>softwares</i> de simulação dinâmica juntamente com as suas aplicações e se são gratuitos.....	22
Tabela 2 - Zona de conforto.....	26
Tabela 3 - Valores para densidade e radiação proveniente dos equipamentos, consoante retirado do RSECE.....	32
Tabela 4 - Diferentes classes de inércia tendo em conta as suas grandezas.	45
Tabela 5 - Ganhos internos simulados pelo <i>DesignBuilder</i> , todos eles na localidade Porto. Valores em kWh.....	46
Tabela 6 - Diferentes necessidades de arrefecimento para os diferentes edifícios com inércia fraca.	46
Tabela 7 - Diferentes necessidades de arrefecimento e ganhos totais para os diferentes edifícios com inércia forte.....	47
Tabela 8 - Valores de densidade e condutividade para todos os materiais usados nas diferentes simulações do edifício.	49
Tabela 9 - Valores do fator de correção, definidos a partir do valor calculado através da equação 22.	50
Tabela 10 - os valores necessários ao cálculo da inércia (Inércia forte).	51
Tabela 11 - Todos os valores necessários ao cálculo da inércia (Inércia fraca).	51
Tabela 12 - Diferentes frações usadas para o cálculo do ganho de iluminação.	53
Tabela 13 - Resultados para o cinema utilizando os vários sensores do sistema de arrefecimento gratuito. Inércia fraca.....	54
Tabela 14 - Resultados para o escritório utilizando os vários sensores do sistema de arrefecimento gratuito. Inércia fraca.....	55
Tabela 15 - Resultados para a sala de aula utilizando os vários sensores do sistema de arrefecimento gratuito. Inércia fraca.....	55
Tabela 16 - Resultados para o cinema utilizando os vários sensores do sistema de arrefecimento gratuito. Inércia forte.....	55
Tabela 17 - Resultados para o escritório utilizando os vários sensores do sistema de arrefecimento gratuito. Inércia forte.....	55
Tabela 18 - Resultados para a sala de aula utilizando os vários sensores do sistema de arrefecimento gratuito. Inércia forte.....	56
Tabela 19 - Resultados para a sala de aula e escritório utilizando ventilação noturna. Inércia fraca.....	56
Tabela 20 - Resultados para a sala de aula e escritório utilizando ventilação noturna. Inércia forte.....	56
Tabela 21 - Resultados para os diferentes tipos de edifício sem a utilização de um sistema de arrefecimento gratuito. Inércia fraca.	57
Tabela 22 - Resultados para os diferentes tipos de edifício sem a utilização de um sistema de arrefecimento gratuito. Inércia forte.....	57
Tabela 23 - Poupança anual média para Beja e Porto no primeiro edifício simulado.	77
Tabela 24 - Poupança anual média para Beja e Porto no segundo edifício simulado.	77

Índice de gráficos

Gráfico 1 - Todos os valores de arrefecimento total para os edifícios com inércia fraca sem sistema de arrefecimento gratuito.	58
Gráfico 2 - Comparação entre os valores para o arrefecimento total no cinema para inércia forte e fraca.	59
Gráfico 3 - Comparação entre os valores para o arrefecimento total no escritório para inércia forte e fraca.	59
Gráfico 4 - Comparação entre os valores para o arrefecimento total na sala de aula para inércia forte e fraca.	60
Gráfico 5 - Comparação entre os valores para o arrefecimento total, separados por tipo de sensor, no cinema para inércia fraca.	60
Gráfico 6 - Comparação entre os valores para o arrefecimento total, separados por tipo de sensor, no escritório para inércia fraca.	61
Gráfico 7 - Comparação entre os valores para o arrefecimento total, separados por tipo de sensor, na sala de aula para inércia fraca.	61
Gráfico 8 - Comparação entre os valores para o arrefecimento total, separados por tipo de sensor, no cinema para inércia forte.	62
Gráfico 9 - Comparação entre os valores para o arrefecimento total, separados por tipo de sensor, no escritório para inércia forte.	62
Gráfico 10 - Comparação entre os valores para o arrefecimento total, separados por tipo de sensor, na sala de aula para inércia forte.	63
Gráfico 11 - Comparação entre valores para o arrefecimento total com e sem arrefecimento gratuito controlado por sensor. Valores para o cinema com inércia fraca.	63
Gráfico 12 - Comparação entre valores para o arrefecimento total com e sem arrefecimento gratuito controlado por sensor. Valores para o escritório com inércia fraca.	64
Gráfico 13 - Comparação entre valores para o arrefecimento total com e sem arrefecimento gratuito controlado por sensor. Valores para a sala de aula com inércia fraca.	64
Gráfico 14 - Comparação entre valores para o arrefecimento total com e sem arrefecimento gratuito controlado por sensor. Valores para o cinema com inércia forte.	65
Gráfico 15 - Comparação entre valores para o arrefecimento total com e sem arrefecimento gratuito controlado por sensor. Valores para o escritório com inércia forte.	65
Gráfico 16 - Comparação entre valores para o arrefecimento total com e sem arrefecimento gratuito controlado por sensor. Valores para a sala de aula com inércia forte.	66
Gráfico 17 - Comparação entre valores para o arrefecimento total com e sem arrefecimento gratuito a partir de ventilação noturna. Valores para escritório com inércia fraca.	67
Gráfico 18 - Comparação entre valores para o arrefecimento total com e sem arrefecimento gratuito a partir de ventilação noturna. Valores para sala de aula com inércia fraca.	67
Gráfico 19 - Comparação entre valores para o arrefecimento total com e sem arrefecimento gratuito a partir de ventilação noturna. Valores para escritório com inércia forte.	68
Gráfico 20 - Comparação entre valores para o arrefecimento total com e sem arrefecimento gratuito a partir de ventilação noturna. Valores para sala de aula com inércia forte.	68
Gráfico 21 - Comparação entre os valores para o arrefecimento total, separados por tipo de sensor, para o cinema.	71
Gráfico 22 - Comparação entre os valores para o arrefecimento total, separados por tipo de sensor, para o escritório.	71
Gráfico 23 - Comparação entre os valores para o arrefecimento total, separados por tipo de sensor, para a sala de aula.	72

Gráfico 24 - Comparação entre valores para o arrefecimento total com e sem arrefecimento gratuito controlado por sensor.....	72
Gráfico 25 - Comparação entre valores para o arrefecimento total com e sem arrefecimento gratuito controlado por sensor.....	73
Gráfico 26 - Comparação entre valores para o arrefecimento total com e sem arrefecimento gratuito controlado por sensor.....	73
Gráfico 27 - Comparação entre valores para o arrefecimento total com e sem arrefecimento gratuito a partir de ventilação noturna para o escritório.	74
Gráfico 28 - Comparação entre valores para o arrefecimento total com e sem arrefecimento gratuito a partir de ventilação noturna para a sala de aula.	74

Lista de siglas

Sigla	Unidade	Descrição
Ktot	W/K	coeficiente de perda de arrefecimento total
Tls	K	limite superior da temperatura de conforto
Tb	K	temperatura de equilíbrio
qc	W	taxa de energia necessária para o arrefecimento
δc	---	condição para o arrefecimento
Qc	J	energia necessário para o arrefecimento
Te	K	temperatura exterior
dhc	K h	graus-hora para o arrefecimento
Tfr	K	temperatura “livre” (<i>free running</i>)
qganho	W	ganhos totais internos e solares
Tli	K	temperatura do limite inferior de conforto
dhfr	K h	graus-hora do arrefecimento gratuito
δvm	---	condição para a ventilação mecânica
Ktot	W/K	coeficiente de perda de arrefecimento total
Nvc	KWh/m ² .ano	necessidades nominais de arrefecimento
Qg	kWh	ganhos totais brutos do edifício ou fração autónoma
η	unidade	fator de utilização dos ganhos
Ap	m ²	área útil do pavimento
γ	unidade	relação entre ganhos totais brutos e perdas
Qt	kWh	perdas de calor pela envolvente
Qv	kWh	as perdas de calor resultantes da renovação de ar
Msi	kg/m ²	massa superficial útil
mt	kg/m ²	massa total do elemento
R	m ² .°C/W	resistência térmica
r	---	fator corretivo
Si	m ²	área superficial interior do elemento
ρ	kg/m ³	densidade
κ	W/m.k	condutividade
It	kg/m ²	Inércia térmica
Ap	M2	área do piso

1. Introdução

1.1. Sumário

Vivemos num mundo onde a eficiência energética tem uma importância cada vez maior, onde a poluição ambiental e rápida escassez de recursos naturais têm-se tornado nos desafios tecnológicos, sociais e políticos que o mundo deve enfrentar com maior urgência.

Em linha com este importante tema, esta tese irá focar-se na conservação energética dos edifícios que, simultaneamente reduz o custo energético de um edifício, o consumo de combustível e consequentemente a libertação de gases de estufa.

Irão ser analisadas novas estratégias ou metodologias, implementando um sistema de baixa energia denominado de arrefecimento gratuito, através de um *software* capaz de simular o consumo energético de edifícios, nomeadamente o *DesignBuilder*.

1.2. Enquadramento

A produção e consumo de energia têm sido a base para o crescimento da nossa civilização. Desde a Idade da Pedra, quando fogo era produzido ao golpear uma pedra noutra, que a Humanidade tem acompanhado o seu desenvolvimento com novos métodos de produção e consumo energético. A revolução industrial foi um ponto fulcral na história da produção energética, que testemunhou um aumento exponencial no uso desta e a uma gradual mudança para a nossa enorme dependência de eletricidade. O consumo *per capita* de eletricidade foi começando a ser visto como um indicativo do crescimento de uma região, de um país, ou simplesmente de diferentes áreas geográficas específicas. Quanto maior o consumo de energia, em particular de eletricidade, maior seria o desenvolvimento dessa área, iniciando-se assim a corrida pela geração e consumo de energia [1].

Durante várias décadas, ou mesmo séculos, todos nós permanecemos despreocupados sobre o facto que qualquer forma de energia eventualmente extingue-se e se o recurso não fosse responsabilmente usado, evitando qualquer tipo de consumo desnecessário, gerações futuras poderiam ficar privadas dos suprimentos essenciais para satisfazer as suas necessidades mais básicas.

Tem sido apenas nas últimas décadas que este problema tem vindo a obter um maior reconhecimento. Uma distribuição desigual do consumo energético tem levado à crença de que países que tiveram a vantagem de terem sido os primeiros a aproveitar as fontes de energia, usaram indiscriminadamente os recursos naturais, elevando o padrão de consumo energético de forma desproporcional. E agora, à medida que este problema vem aumentando de importância, os países menos desenvolvidos sentem que não chegarão sequer a um nível médio de consumo, vendo assim serem-lhes negadas as condições de vida que outros têm desfrutado durante décadas. Há países cujo consumo é menos de 500 kWh por habitante por ano, havendo outros com um consumo de mais de 20.000 kWh por habitante por ano, o desejo de melhorar o nível de consumo tem levado a países em desenvolvimento a aumentar drasticamente os seus gastos energéticos, numa altura em que esta começa a escassear [2].

Globalmente, ainda não fomos bem-sucedidos no aproveitamento de energia solar de uma forma economicamente atraente, tendo outras formas de energia renovável sido igualmente exploradas somente de uma forma limitada.

Até mesmo os recursos hidroelétricos foram explorados na medida de apenas 25% globalmente. Como resultado, a produção de energia tem estado substancialmente dependente de combustíveis fósseis.

As nossas apreensões relativamente à perda de recursos não renováveis nos próximos 50 a 100 anos, se a produção acelerada de eletricidade à base de combustíveis fósseis não for controlada, juntamente com o aumento da nossa “pegada ecológica” levaram vários países a juntarem-se para tomar medidas urgentes. Todos os aspetos do consumo energético têm vindo a ser dissecados com o intuito de descobrir possíveis áreas de redução, conservação e poupança, para que, sem afetar a qualidade e nível dos serviços, o consumo de eletricidade necessária pudesse ser significativamente reduzida. Todos os países ricos, em desenvolvimento ou pobres, nos últimos 10 anos, começaram a olhar para a necessidade de um consumo mais eficiente de energia. De facto, os países mais ricos mostraram um maior grau de preocupação, pois nestes países o nível de emissões de CO₂ *per capita* é extremamente alto.

Se alguns destes países decidiram, ou não, seguir em frente com a aplicação do acordo alcançado no protocolo de Quioto, o facto é que começaram a tomar ações que levarão a um padrão de consumo mais eficiente. Há também países que aprovaram leis, ditando o que é permitido na produção e consumo de energia, estabelecendo também normas de consumo para variados tipos de uso.

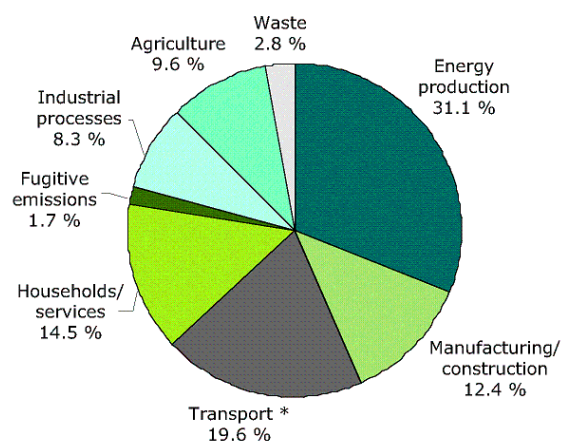
No entanto, muito do esforço feito pela maioria dos países permanece assente nos combustíveis fósseis, continuando inevitavelmente a concentrar-se em adquirir petróleo ou gás suficientes para mantermos o nosso estilo de vida extremamente consumista [2].

1.2.1. A importância do aquecimento global

O medo de um rápido esgotamento dos recursos energéticos tem sido agravado com as preocupações relativas ao aquecimento global e outras questões relacionadas com o mesmo. É um facto que uma maior produção de energia, na maioria dos casos, está associada à quantidade de emissões de CO₂. Da queima de combustíveis à base de carbono, como gasolina, metano ou propano que usamos para quase a totalidade da energia que consumimos, resulta dióxido de carbono.

A quantidade desse mesmo dióxido de carbono tem vindo a subir a um ritmo alarmante desde a Revolução Industrial, sendo que a destruição das florestas também contribuem para o aumento do gás. Infelizmente, o dióxido de carbono tem um papel central no aquecimento global, pois este tem a capacidade de absorver calor, retendo-o na nossa atmosfera e provocando o chamado efeito de estufa. Tendo em conta os gases de efeito de estufa libertados na União Europeia, verificamos que a produção energética é a que mais emite, estando o sector residencial em terceiro com 14.5% do total emitido (figura 1) [2].

Total greenhouse gas emissions by sector in EU-27, 2008



* Excludes international aviation and shipping
(6 % of total GHG emissions)

Figura 1 – A produção de energia envolve a maior emissão de gases de efeito de estufa (31.1%), aparecendo o sector residencial em terceiro, depois dos transportes com 14.5% do total de gases libertados na atmosfera [3].

O CO₂, apesar dos fatores negativos evidentes, é um gás essencial para a vida na Terra, agindo na atmosfera terrestre como uma barreira evitando que a radiação solar, fonte de calor, escape para o espaço. Este processo faz com que a superfície da Terra seja relativamente quente, suportando assim a vida terrestre.

Existem contudo cada vez mais evidências científicas que confirmam que o contínuo aumento de dióxido de carbono na atmosfera, provocado pela queima de combustíveis fósseis, tem vários efeitos prejudiciais. Foi estimado por peritos do IPCC (*“Intergovernmental Panel of Climate Change”*) que uma redução de 60% das emissões de dióxido de carbono será necessária para estabilizar as concentrações atuais. Também descobriu-se, devido à lenta resposta do clima, que a humanidade já garantiu alguma forma de alterações climáticas durante os próximos 50 anos.

Para além deste aspeto nocivo, de acordo com um artigo da *National Geographic* de 2004, cerca de metade do dióxido de carbono produzido por humanos desde a Revolução Industrial, estará dissolvido nos oceanos. Embora se julgue que este facto possa servir para abrandar o aquecimento global, constatou-se que esta concentração de gás pode estar a mudar a própria composição química dos oceanos, provocando assim efeitos nefastos em toda a vida marinha. Nunca será demais sublinhar a importância dos oceanos na vida do nosso planeta [4].

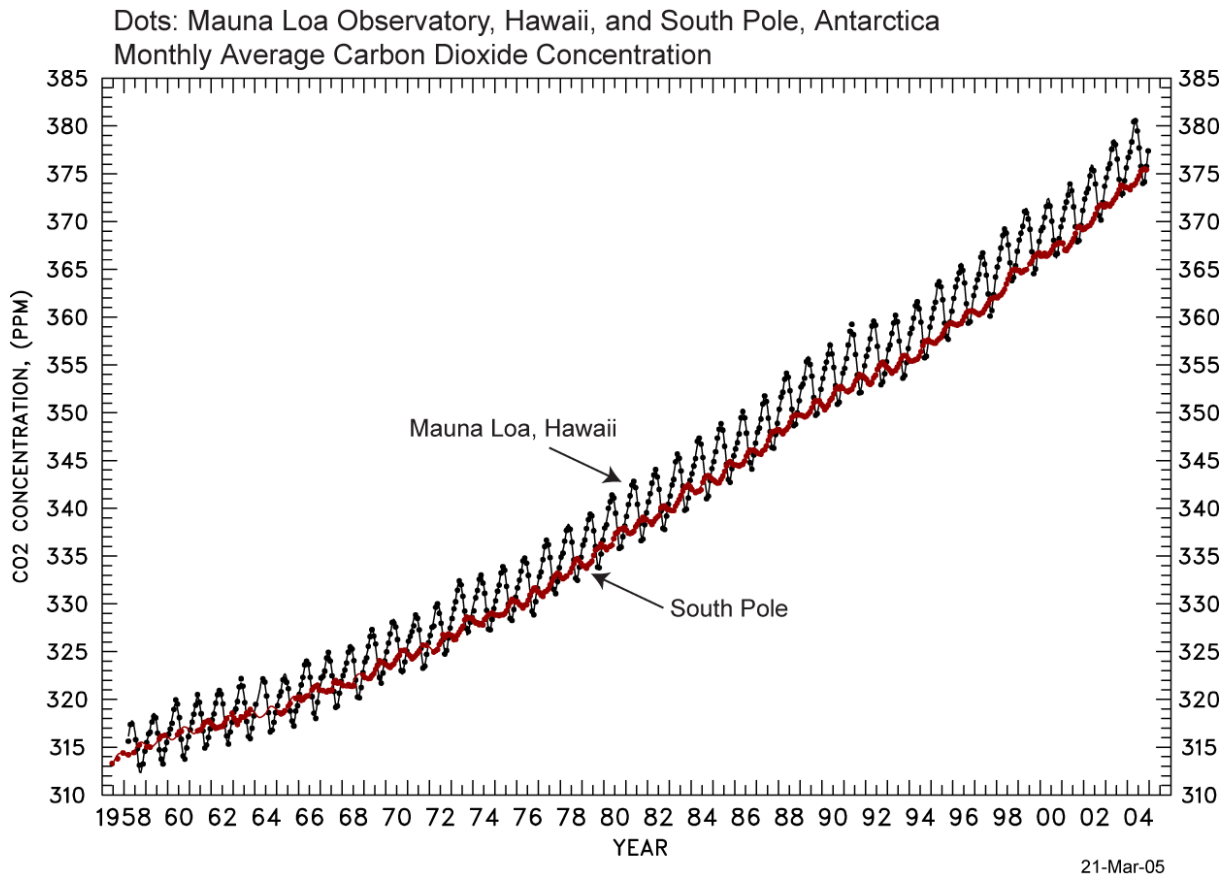


Figura 2 – Evolução dos níveis de CO₂ (concentração em partes por milhão) desde a década de 50. Todos os anos há um declínio temporário na curva: sempre que é Primavera e Verão no Hemisfério Norte, o CO₂ decresce devido à vegetação que absorve o gás [5].

É então neste enquadramento de escassez energética mas ao mesmo tempo consumismo exacerbado de recursos energéticos que a eficiência energética é cada vez mais importante, não só por ser mais sustentável a nível económico, ou útil a nível político, como também a nível ambiental, devido à emissão de dióxido de carbono principalmente.

1.3. Objetivos

O trabalho centra-se no estudo e parametrização de arrefecimento gratuito em sistemas de climatização do tipo “tudo ar”, tendo em conta as condições locais relevantes, nomeadamente do edifício e do clima, usando uma ferramenta numérica adequada.

O objetivo do trabalho prende-se com a utilização de ferramentas de simulação dinâmica do consumo de energia em edifícios para o estudo de estratégias de redução de consumo energético em sistemas de climatização de edifícios de serviços. Neste trabalho foca-se uma estratégia em particular, normalmente designada por arrefecimento gratuito simulado utilizando o motor de cálculo *EnergyPlus*, integrado no *DesignBuilder*.

Com as simulações efetuadas, será possível determinar o potencial de arrefecimento consoante a localização, edifício e mesmo a eficácia de diferentes técnicas de arrefecimento gratuito usadas. Finalmente, os resultados obtidos serão analisados através da simulação de um edifício desenhado de maneira realista, procedendo-se à sua comparação.

1.4. Revisão bibliográfica

1.4.1. Arrefecimento gratuito

O que é o arrefecimento gratuito? O arrefecimento gratuito é uma estratégia de arrefecimento que fornece um meio de manter ou reduzir a temperatura interna sem a necessidade de executar o compressor no sistema de refrigeração.

Este pode ocorrer quando a temperatura do ambiente externo é menor à do ar interior. Esse ar exterior é então transferido para o interior do edifício, diretamente ou indiretamente. Esta técnica pode ser aplicada tanto em sistemas de refrigeração que usem água como em sistemas ar/ar.

Esta técnica pode ser utilizada usando uma mistura entre o ar exterior e um sistema de recirculação, através de um sistema automatizado de mistura de ar. Válvulas são colocadas para controlar o ar inserido através das condutas, o ar retirado e o ar para recirculação. Quando o ar exterior é mais frio, a quantidade de ar fresco é aumentado e quantidade de ar recirculado é reduzido para obter a temperatura necessária de ar fornecido. Deste modo, o arrefecimento através de equipamento de refrigeração é completamente evitado em determinadas alturas do ano e muitas das vezes durante a noite.

Quando a temperatura do ar exterior é mais elevada que a do interior no Verão, o sistema de mistura do ar irá modular para o mínimo de ar exterior, para manter a carga no equipamento de refrigeração para um mínimo, embora garantindo que a quantidade de ar fresco introduzida no edifício é suficiente para atender às exigências de ocupação, oferecendo uma melhoria considerável na qualidade do ar.

De todo este processo resulta uma poupança significativa de energia, um menor encargo energético e uma menor manutenção. A melhoria na qualidade do ar irá também oferecer uma experiência mais positiva para as pessoas que utilizam o espaço [6].

Benefícios diretos

- Redução de horas de utilização do compressor
- Redução dos gastos energéticos e custos de funcionamento.
- Melhor qualidade do ar para uma grande parte do ano ao introduzir maiores quantidades de ar fresco.

Benefícios indiretos

- Redução dos custos do ciclo de vida do compressor ao reduzir as horas de funcionamento.
- Aumento do ciclo de vida do compressor.

Principais desvantagens

- Eficácia do sistema vinculada às condições ambientais.
- Implementar um sistema de arrefecimento gratuito num sistema de climatização que não esteja previamente preparado para tal, pode envolver elevados custos iniciais.

1.4.2. Técnicas de arrefecimento gratuito

1.4.2.1. Ventilação de conforto diurna

É a técnica de arrefecimento gratuito mais utilizada, onde se proporciona um fluxo de ar exterior durante o dia, removendo diretamente os ganhos de calor.

Através do aumento da transferência de calor convectiva e evaporativa e da diminuição da temperatura interior, obtém-se o conforto térmico [7].

1.4.2.2 Ventilação noturna

O conceito básico de ventilação noturna envolve arrefecer o edifício durante a noite para que, durante o período de ocupação, algum do calor possa ser dissipado. Como esta técnica requer uma elevada diferença de temperatura entre o ar exterior e o interior, a eficiência da ventilação noturna é altamente sensível às condições climáticas e, conseqüentemente, ao aquecimento do clima [8].

Uma técnica bastante usada consiste em “obrigar” o ar fresco noturno a passar numa laje, arrefecendo-a assim ao longo da noite. O ar mais quente do dia seguinte irá arrefecer ao passar nessa mesma laje ajudando a reduzir o pico de temperatura diurna. Naturalmente, em climas quentes será na grande maioria dos casos vantajoso usar esta técnica, no entanto, em dias que sejam extremamente quentes, a vantagem do uso da laje é menos óbvia pois a diferença da energia consumida pelo ventilador durante a noite com a energia poupada pelo arrefecimento da laje pode ser marginal, podendo mesmo ser contraproducente. Em climas predominantemente quentes esta estratégia de arrefecimento passivo será razoavelmente simples, mas num clima temperado as vantagens são menos claras [9].

Independentemente do modo como será implementada a ventilação noturna e de acordo com uma pesquisa levada a cabo pelo *Building Research Association* no Reino Unido, a ventilação noturna, deverá ser iniciada se alguma ou uma combinação dos seguintes pontos ocorrerem:

- Temperatura de pico interior excede os 23°C
- Média de temperatura interior excede os 22°C
- Média de temperatura exterior durante a tarde é superior a 20°C

Concluiu-se também que a ventilação noturna deverá prosseguir se os seguintes critérios se verificarem:

- Temperatura interior é superior à do exterior por 2°C
- Temperatura interior é superior à temperatura designada para o aquecimento (climatização)
- Temperatura do ar exterior é superior a 12°C

O arrefecimento noturno deve ser levado a cabo todos os dias da semana, fora dos períodos de ocupação do edifício e assim que os critérios acima definidos não se verificarem, o arrefecimento deve continuar em mais duas noites adicionais, caso este se verifique nas cinco noites anteriores.

De notar que uma temperatura mínima deve ser definida na climatização para evitar um arrefecimento excessivo, onde um aquecimento acrescido seria necessário, sendo assim contraproducente.

1.4.2.3 Arrefecimento radiativo

A emissão de radiação por parte dos elementos da envolvente exterior de um edifício poderá ser utilizada no arrefecimento do mesmo. As perdas por radiação ocorrem durante os períodos diurnos e noturnos, tratando-se pois de um processo contínuo. É, no entanto, durante o período noturno que os seus efeitos se fazem mais sentir em virtude da ausência de radiação solar direta [10].

Será neste contexto que um sistema *roof pond* pode ser muito eficiente como estratégia de arrefecimento no verão. No ciclo de arrefecimento (figura 3), os painéis isolantes permanecem fechados durante o dia, rejeitando ganhos solares indesejados. A lagoa (*pond*) age como uma “esponja térmica”, absorvendo o calor interno conduzido através do interior do teto que o suporta. Durante a noite, os painéis são recolhidos, expondo o lago ao céu noturno e ao ar mais fresco.

O lago perde calor por radiação para o exterior através de convecção natural para o ar. Sistemas *roof pond* são particularmente eficazes em regiões com pouca humidade e em noites de verão sem nuvens. Se as condições não forem as ideais, um aumento de dissipação de calor por evaporação pode ser integrado.

Existem algumas considerações a ter em conta para sistemas *roof pond*. Estes devem ter o seu zénite (diretamente acima) desobstruído, árvores, paredes ou edifício adjacentes podem afetar a capacidade de arrefecimento ao reduzir as trocas de calor com o ar noturno.

Nuvens também podem interferir com a performance de um sistema de *roof pond*, por esse motivo, este tipo de sistema é menos eficiente em áreas costeiras, onde nuvens ou nevoeiro frequentemente provêm do oceano durante a noite. Felizmente, essas mesmas necessitam de um arrefecimento reduzido ou mesmo nulo durante o Verão [11].

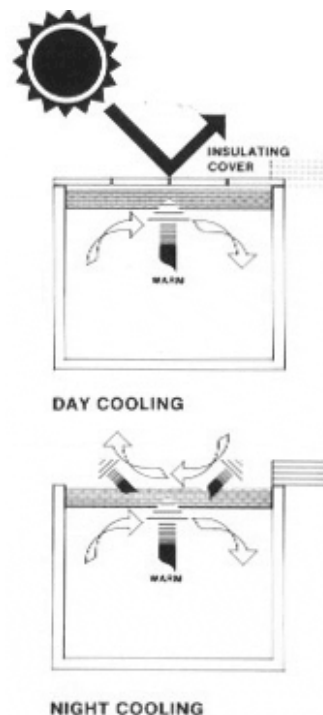


Figura 3 - Sistema *roof pond*. Acima – os painéis são mantidos fechados durante o dia. Abaixo – os painéis são abertos depois do pôr-do-sol, libertando todo o calor absorvido durante o dia [11].

1.4.2.5 Arrefecimento evaporativo

Quando água evapora, absorve uma grande quantidade de calor do meio envolvente (cerca de 500 BTU por quilograma de água evaporada). O exemplo mais conhecido deste fenómeno é o arrefecimento que a evaporação do suor na pele humana proporciona.

Em climas quentes e áridos a temperatura corporal é parcialmente controlada pela rápida evaporação do suor na pele, já em climas quentes com uma elevada humidade atmosférica, o efeito de arrefecimento é menor, embora em ambas as situações a taxa de evaporação seja proporcional ao movimento do ar em volta.

O arrefecimento evaporativo baseia-se na diminuição de temperatura associada à mudança de fase da água do estado líquido ao estado de vapor. Quando o decréscimo é acompanhado com um aumento do conteúdo do vapor de água, trata-se de um arrefecimento evaporativo direto.

Neste caso, o ar exterior é arrefecido por evaporação da água, antes de entrar no edifício, usando um filtro de humidade ou bloco húmido (figura 4).

Estratégias de arrefecimento gratuito como as que usam tubagem subterrânea têm o mesmo princípio usando, no entanto, sistemas naturais para distribuição do ar. Para além disso, se os tubos forem de material poroso e o chão acima for húmido e estiver a uma temperatura baixa, alguma evaporação irá ocorrer dentro do tubo [11].

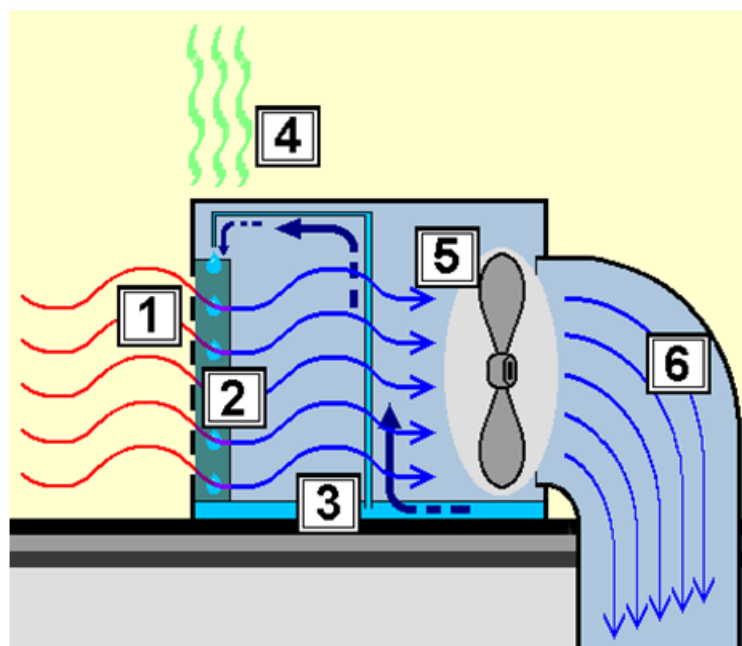


Figura 4 - O ar mais seco vindo do exterior (1) é forçado pela ventilação (5) a passar por um bloco húmido (2), mantido por um reservatório de água (3). À medida que a humidade é captada o calor do ar é absorvido pela água (4), resultando num ar mais fresco (6) [12].

Em algumas áreas onde podem existir alturas de maior humidade (por ex. monção) o calor sensível continua a ser mitigado através do arrefecimento gratuito, no entanto, o calor latente contido no ar húmido é mais difícil de dissipar, o que torna o arrefecimento evaporativo menos eficaz. A integração de um sistema de desumidificação corrige facilmente esta condição problemática de curto prazo.

Em climas mais severos, onde temperaturas noturnas permanecem muitas vezes acima dos 30°C durante o verão, *sprays* podem ser usados para conseguir um arrefecimento natural máximo em telhados “padrão” ou mesmo em telhados com arrefecimento, como os *roof pond*. Na abordagem mostrada na figura 5, a água é bombeada através de aspersores junto ao “pico” da casa, fazendo com que a água desça suavemente ao longo da inclinação do telhado, aumentando grandemente a taxa de evaporação, expondo uma superfície muito maior ao ar noturno. Os aspersores requerem um pouco de energia externa para transportar a água ao telhado e por isso mesmo este sistema não será passivo, no entanto, o total de energia consumida pelo sistema é muito escassa comparada à energia poupada e a água em excesso pode ser captada e reutilizada ou usada noutro lugar na habitação [11].



Figura 5 - Arrefecimento por convecção e radiação podem ser integrados em conjunto para aumentar a capacidade de arrefecimento [13].

Com todos os métodos de arrefecimento por evaporação, é importante maximizar o fluxo de ar que atravessa a água exposta. Ar fresco deve estar sempre disponível para substituir o ar húmido que junta-se perto ou acima da água, caso contrário, o ar ficará rapidamente saturado com vapor de água e a taxa de arrefecimento diminuirá abruptamente.

Cantos, arestas e outras estruturas ou edifícios que podem bloquear ou desviar ventos sobre as superfícies de água devem ser cuidadosamente evitados, podendo mesmo um pequeno ventilador ser instalado, para perturbar o ar acima da água, o que ajudará a aumentar a taxa de evaporação num dia, ou noite, quente e abafado.

O arrefecimento evaporativo tem demonstrado ser uma alternativa eficaz à climatização convencional usada em zonas mais quentes, mesmo desérticas. A seleção de uma técnica de arrefecimento por evaporação deve ser feita cuidadosamente, através da análise das condições climáticas locais. Estes sistemas de arrefecimento devem ser integrados no próprio *design* da casa e quando possível, com o design de um sistema de aquecimento solar, ao integrar estes sistemas numa fase inicial, pode ser obtida uma maior eficiência e conseqüente poupança de custos [11].

1.4.2.5 Geotermia

Esta técnica de arrefecimento gratuito usa água fria bombeada do fundo de um lago (ou mesmo oceano) como um dissipador de calor, controlando assim a temperatura.

A eficiência de uma bomba de calor aumenta à medida que o dissipador fica mais frio, tendo esse aspeto em conta, a água do lago pode reduzir a necessidade energética do sistema de arrefecimento quando este está disponível. É um conceito similar ao aproveitamento de energia geotérmica, mas geralmente mais simples de construir, dada uma fonte de água adequada.

A água é mais densa a 3.98 °C à pressão atmosférica normal, assim sendo, à medida que arrefece esta irá subir. Da mesma forma, se a temperatura aumentar para além dos 3.98 °C, a densidade da água irá igualmente diminuir, fazendo com que ela suba. É devido a este fenómeno que a água dos lagos é mais quente à superfície durante o verão. A combinação destes dois efeitos significa que o fundo de corpos profundos de água, afastados das regiões equatoriais, estará a uma temperatura constante de 3.98 °C [14].

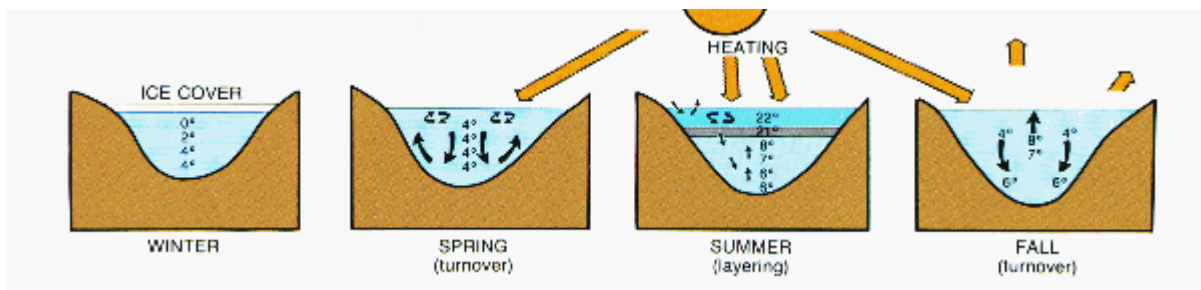


Figura 6 – Diversas fases de um lago ao longo do ano. A mistura acontecerá quando a densidade da água é mais ou menos uniforme, fazendo com que a temperatura também o seja independentemente da profundidade, já a estratificação irá “separar” a água [15].

Estando então este sistema implementado num local que garanta a sua viabilidade, a água de lago será suficientemente fria para que a porção de refrigeração dos sistemas climatização possa ser desligada durante certas condições ambientais e o calor do interior do edifício possa ser transferido diretamente para a água de lago que funciona como dissipador de calor. Uma vantagem adicional do arrefecimento por água profunda de lago é o facto de poupar energia durante períodos de pico de consumo, como as tardes de verão, quando grande parte da eletricidade usada do edifício vai para a climatização.

1.4.3 Técnicas de arrefecimento passivo

1.4.3.1 Arrefecimento passivo

O arrefecimento gratuito, embora a sua designação possa ser um pouco enganadora, não é totalmente gratuito pois será sempre necessária energia para a ventilação ou bombas que circulam a água ou ar para a climatização do edifício. Por outro lado existem outros sistemas, denominados de passivos, em que não é necessário qualquer tipo de consumo energético para arrefecer ou aquecer o edifício e, embora não seja este o tipo de sistema que irão ser analisados nesta tese, é importante distinguir estes dois tipos de climatização para a revisão bibliográfica ser mais completa. Passamos então a identificar alguns sistemas ou técnicas deste tipo.

1.4.3.2 Eficiência energética em edifícios

Uma das maneiras mais comuns e ao mesmo tempo mais óbvias de arrefecimento ou mesmo aquecimento passivo envolve pensar a eficiência energética desde o início, isto é, desde a fase de construção do edifício. De facto, existem estratégias de conceção e construção dos edifícios através das quais podemos melhorar o comportamento e a eficiência energética dos mesmos.

As estratégias que têm em especial atenção as condições climáticas do local e da sua interação com o clima, proporcionando a adequação do edifício ao clima, designam-se geralmente por estratégias bioclimáticas. São no fundo regras gerais que se destinam a orientar a conceção do edifício tirando partido das condições climáticas de cada local [10].

De seguida realçam-se algumas boas práticas a ter em conta.

- **Incidência Solar**

No Inverno interessa promover os ganhos de radiação, pelo que se apresenta benéfica a abertura de vãos envidraçados no quadrante Sul. No Verão interessa restringir esses mesmos ganhos, pelo que se apresenta importante que os vãos sejam dotados de dispositivos sombreadores eficazes. Principalmente nos vãos a Poente e Nascente.

Nos quadrantes Norte, Nascente e Poente, seria desejável que a abertura de vãos se restrinja a menores dimensões, desde que isso seja aceitável em termos das outras exigências também presentes no edifício.

- **Perdas de Calor**

Restringir a Condução é uma estratégia bioclimática que, num clima temperado como o de Portugal, se deve promover nos edifícios para conseguir obter conforto no seu interior, tanto de Inverno como de Verão. Enquanto no Inverno interessa restringir perdas de calor para o exterior através da envolvente, no Verão torna-se mais favorável restringir os ganhos excessivos de calor exterior de forma a manter uma temperatura mais constante no interior dos edifícios.

- **Ventilação Natural**

No Inverno, quando a temperatura exterior apresenta praticamente sempre valores abaixo das condições de conforto, interessa limitar as infiltrações. No entanto, a renovação do ar interior é uma medida necessária à manutenção das condições de salubridade interior dos edifícios pelo que deve ser sempre assegurado um mínimo recomendável através de um sistema de ventilação, natural, mecânico ou híbrido, adequado.

Todas estas estratégias sendo bem aplicadas, podem ter um impacto profundo no custo energético de um edifício, no entanto, visto que substituímos edifícios antigos com novos muito lentamente, muitas das vezes em intervalos de décadas, é mais importante considerar como usar a energia nos edifícios já existentes [10].

1.4.3.3 Coberturas ajardinadas

A integração de uma cobertura ajardinada, por parte do projetista, num determinado edifício, tem como principais objetivos o fator estético e consequente acréscimo de valor económico do projeto mas tem também em conta todas as características térmicas que este introduz, como vista a reduzir as necessidades térmicas de aquecimento e arrefecimento (redução das infiltrações de calor no Verão e das perdas no Inverno).

A existência de tais vantagens térmicas deve-se essencialmente à capacidade de influenciar as cargas térmicas do edifício, por parte das coberturas ajardinadas.

As coberturas ajardinadas podem alterar as cargas térmicas de várias formas distintas: evapotranspiração, sombreamento, atenuação da radiação incidente e proteção contra ventos indesejáveis. Deve ainda mencionar-se outra forma de influenciar as cargas térmicas por parte das coberturas ajardinadas, sendo que esta é menos relevante que as anteriores, e que se prende com a criação de um microclima que altera as condições de conforto no exterior [16].

A utilização de coberturas ajardinadas permite, na sua maioria, a diminuição da carga térmica, através do efeito de evapotranspiração, pois este é responsável por eliminar parte da carga térmica presente na superfície superior da cobertura (num dia quente é responsável pela redução de temperatura da superfície externa na ordem dos 58%), tendo-se ainda alguns efeitos paralelos a esta utilização, como o aumento da inércia térmica, a redução de ganhos por radiação e um aumento do isolamento térmico [17].



Figura 7 - A utilização de coberturas ajardinadas não é algo de recente, aliás estas têm sido usadas desde 500 a.C. com os lendários jardins suspensos da Babilónia [18].

1.4.3.4 Paisagismo

Com árvores estrategicamente colocadas, é possível baixar 25% do consumo energético utilizado para o aquecimento e arrefecimento de uma habitação, de facto, em média, um paisagismo (não existe uma tradução direta para o nome original desta técnica, denominada de *landscaping*) bem executado proporciona uma poupança energética suficiente para ter-se um retorno do investimento feito em menos de 8 anos.

Uma árvore de folha caduca com uma altura de 2.5 metros, por exemplo, custa tanto como um toldo para uma grande janela, mas poupa centenas de euros em custos de arrefecimento, ao mesmo tempo admitindo alguns ganhos solares durante o inverno, não aumentando assim os custos de aquecimento e iluminação.

Como é sabido, a temperatura em parques ou áreas florestais é mais baixa do que qualquer outra zona da cidade que as rodeiam. Sombreamento e evapotranspiração (o processo através do qual a planta liberta vapor de água) proveniente das árvores podem reduzir a temperatura do ar circundante até 10°C. Para além disso, graças ao facto de o ar mais fresco “assentar” perto do solo, a temperatura diretamente abaixo de uma árvore pode ser até 4°C mais baixa do que na área em volta [17].

De facto, estudos feitos pelo *Lawrence Berkeley Laboratory* determinaram que a temperatura do ar no verão pode chegar a ser 13°C mais baixa numa vizinhança com árvores e conseqüente sombreamento, do que sem estas [19].

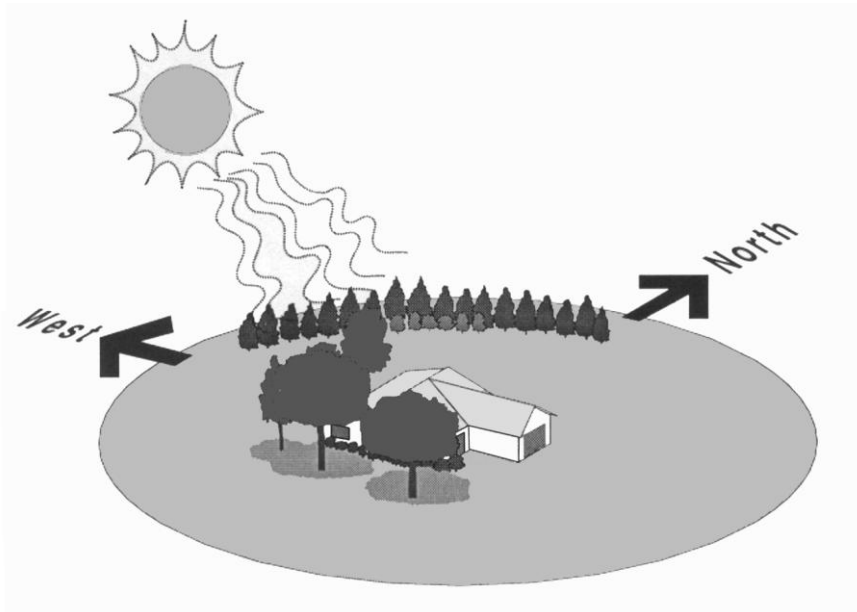


Figura 8 - No Verão, árvores altas plantadas perto da habitação dão sombreamento ao telhado enquanto árvores mais baixas e largas colocadas a oeste bloqueiam o sol da tarde. Árvores a noroeste escudam a casa dos ventos predominantes durante o Inverno [17].

1.4.4 Normalização e regulamentação

A satisfação das necessidades de conforto térmico e de qualidade do ambiente interior dos edifícios implica, em geral, o recurso a meios de ventilação, aquecimento, arrefecimento, humificação e desumidificação. A utilização destes meios deve obedecer, naturalmente, a regras que permitam assegurar as exigências ambientais prescritas e a utilização racional da energia.

Nesse âmbito, o RSECE (DL n.º 79/2006, de 4 de Abril) integra um pacote legislativo composto também pelo DL n.º 78/2006 (Sistema Nacional de Certificação Energética e da Qualidade do Ar Interior nos Edifícios - SCE) e DL n.º 80/2006 (Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios – RCCTE), todos publicados na mesma data e que transpõem para direito nacional a Diretiva 2002/91/CE de 16 de Dezembro, relativa ao Desempenho Energético dos Edifícios.

Neste último RSECE sublinha-se a importância da poupança energética nos edifícios, nomeadamente o arrefecimento gratuito, que por sua vez também garante uma maior salubridade do ar interior, pois de acordo com este documento, o pouco controlo da conformidade do desempenho das instalações com o respetivo projeto aquando da sua receção e a continuada falta de uma prática efetiva de manutenção adequada das instalações durante o seu funcionamento normal têm levado ao aparecimento de problemas de qualidade do ar interior, alguns dos quais com impacte significativo ao nível da saúde pública.

Deste modo, as técnicas de arrefecimento gratuito estudadas nesta tese estão em sintonia com a imposição de regras de eficiência aos sistemas de climatização que permitam melhorar o desempenho energético efetivo mas também garantir uma boa qualidade do ar interior e uma facilitada manutenção [20].

Dentro do regulamento, há um artigo em particular que refere-se especificamente ao arrefecimento gratuito:

“Nos sistemas de climatização do tipo «tudo ar», com um caudal de ar de insuflação superior a 10 000 m³/h, é obrigatória a instalação de dispositivos que permitam o arrefecimento dos locais apenas com ar exterior quando a temperatura ou a entalpia do ar exterior forem inferiores à do ar de retorno, exceto nos casos em que seja demonstrada a não viabilidade económica da sua instalação, segundo a metodologia definida no presente Regulamento [20].”

Para além do aspeto técnico do sistema de climatização, está também definido no RSECE a legalidade do uso de *softwares* de simulação dinâmica. Permite-se que estes sejam utilizados tanto para grandes como para pequenos edifícios de serviços, nos casos em que, pelas especificidades do edifício ou dos sistemas em estudo ou por limitações de alguma ordem, o programa de simulação simplificada não permita simular o edifício da melhor forma, poderá o projetista ou o perito recorrer a programas de simulação detalhada, desde que acreditados pela norma ASHRAE 140-2004 [21].

1.4.5 Dimensionamento e simulação de sistemas

1.4.5.1 Dimensionamento

Conceitos e fundamentos do dimensionamento de um sistema de ar condicionado são baseados nos ganhos ou perdas de calor num edifício.

Naturalmente será necessário remover os ganhos de calor, se estiver quente no exterior. Da mesma forma, será necessário adicionar a componente de perda de calor, se estiver frio no exterior. Em suma, o calor ganho e perdido deve ser equilibrado com a remoção de calor e adicionalmente, para obter o conforto que se deseja.

O ganho ou perda de calor através do edifício depende de:

- A diferença de temperatura entre a temperatura exterior e a temperatura desejada
- O tipo de construção e a quantidade de isolamento que existe no teto e paredes
- O grau de sombreamento nas aberturas do edifício, paredes e telhado
- As dimensões do edifício, nomeadamente as dimensões das paredes, quanto maior for a área de superfície externa, maior será a perda ou ganho de calor através delas
- A quantidade de ar que se infiltra ou escapa do espaço interior. As infiltrações desempenham uma parte importante na determinação do dimensionamento do sistema. Aberturas de portas, janelas, chaminés, são as “portas” por onde o ar pode entrar no edifício.
- A ocupação, quantas mais pessoas ocupam o espaço, maior será o esforço para remover o ganho de calor produzido por elas.
- Atividades praticadas no edifício. Qual a função do espaço: cozinha? Termas? Ginásio?
- A quantidade de iluminação no espaço. Dispositivos de iluminação de alta eficiência geram menos calor.
- Quantidade de calor gerada pelos equipamentos. O número de equipamentos como fogões, máquinas de lavar, computadores ou TVs dentro do espaço, todos contribuem no ganho de calor.

A eficiência, performance, durabilidade e custo do sistema de ar condicionado depende do seu tamanho para os fatores acima descritos. Muitos usam uma simples regra de área do espaço para dimensionar o sistema, a regra mais comum é usar “uma tonelada por cada 45 metros quadrados de piso”. Tal método é útil na estimativa preliminar do tamanho do equipamento.

A principal desvantagem deste método é a presunção de que o projeto de construção não fará qualquer diferença, isto é, as regras para um edifício mal concebido normalmente são as mesmas que para um bom *design*. É importante por isso, acima de tudo, usar o procedimento mais adequado na estimativa das perdas e ganhos de calor [22].

1.4.5.2 Sistema de arrefecimento gratuito

Os sistemas de arrefecimento gratuito insuflam ar exterior fresco para o espaço interior para reduzir o uso de sistemas de arrefecimento mecânico. Estes reduzem tipicamente 20 a 30% da energia de arrefecimento consumida. Na sua forma mais básica, estes sistemas incluem os seguintes componentes (ver figura 9):

- **Válvula de admissão (Outside-air damper):** regula a quantidade de ar exterior que entra no edifício.
- **Válvula de ar de retorno (Return-air damper):** regula a quantidade de ar de retorno é recirculada no edifício.
- **Válvula de exaustão (Exhaust air-damper):** regula a quantidade de ar de retorno que é retirada do edifício.
- **Sensor de temperatura exterior (Outdoor temperature sensor):** Mede a temperatura do ar exterior.
- **Controlador lógico (Economizer logic controller):** Recebe um sinal do sensor anterior, decidindo depois se a válvula de admissão deve ser aberta ou fechada.
- **Atuador:** Muda a posição das válvulas consoante o sinal enviado pelo controlador lógico.
- **“Ligação” (Linkage):** Une o atuador à válvula.

Quando o controlador lógico determina que a temperatura do ar exterior (ou entalpia, em alguns casos) é baixa o suficiente para reduzir a carga de arrefecimento, a válvula de admissão é completamente aberta e o compressor é desligado.

Quando a temperatura exterior torna-se demasiado alta para fornecer arrefecimento ao espaço, a válvula de admissão move para uma posição onde deixa entrar uma quantidade de ar mínima (baseado nas exigências de ar-novo), a válvula do ar de retorno abre e a de exaustão fecha, funcionando o compressor para arrefecer o edifício.

Alguns sistemas de arrefecimento gratuito são denominados de integrados, pois trabalham em conjunto com o sistema de climatização, combinando o ar exterior e o compressor para manter as condições de conforto [23].

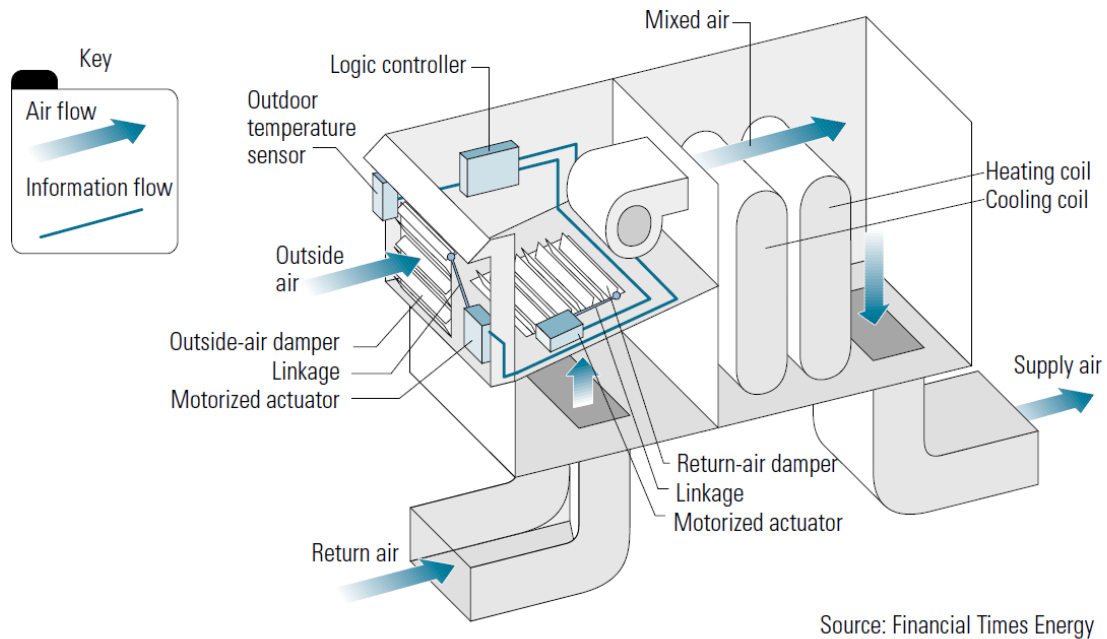


Figura 9 – Esquema de um sistema de arrefecimento gratuito [23].

Um sistema integrado pode usar 100% do ar exterior para fornecer o máximo arrefecimento possível e depois usar o arrefecimento mecânico para compensar a diferença. Um sistema deste tipo, mesmo que não seja obrigatório a sua utilização, deve-se ter sempre em conta, pois permite a poupança de energia em climas mais amenos quando um sistema não integrado não proporciona qualquer poupança [23].

Deste modo, no caso desta tese, o tipo de sistema de arrefecimento gratuito é o integrado, sem qualquer tipo de *lockout*.

1.4.5.3 Softwares de simulação dinâmica de sistemas AVAC

• DesignBuilder

O *DesignBuilder* é um *software* capaz de rapidamente modelar um edifício simulando ao mesmo tempo diferentes sistemas de climatização, com uma interface compreensiva a outro *software* *EnergyPlus*, sendo no fundo uma extensão deste.

O *DesignBuilder* apresenta um modelador *OpenGL* que permite a construção de modelos de edifícios e a sua junção através de posicionamento, alongamento e corte de “blocos” no espaço 3D.

Elementos 3D realistas fornecem um *feedback* visual da espessura real do elemento, volumes e áreas do espaço, não existindo limitações na geometria ou formas das superfícies [24].

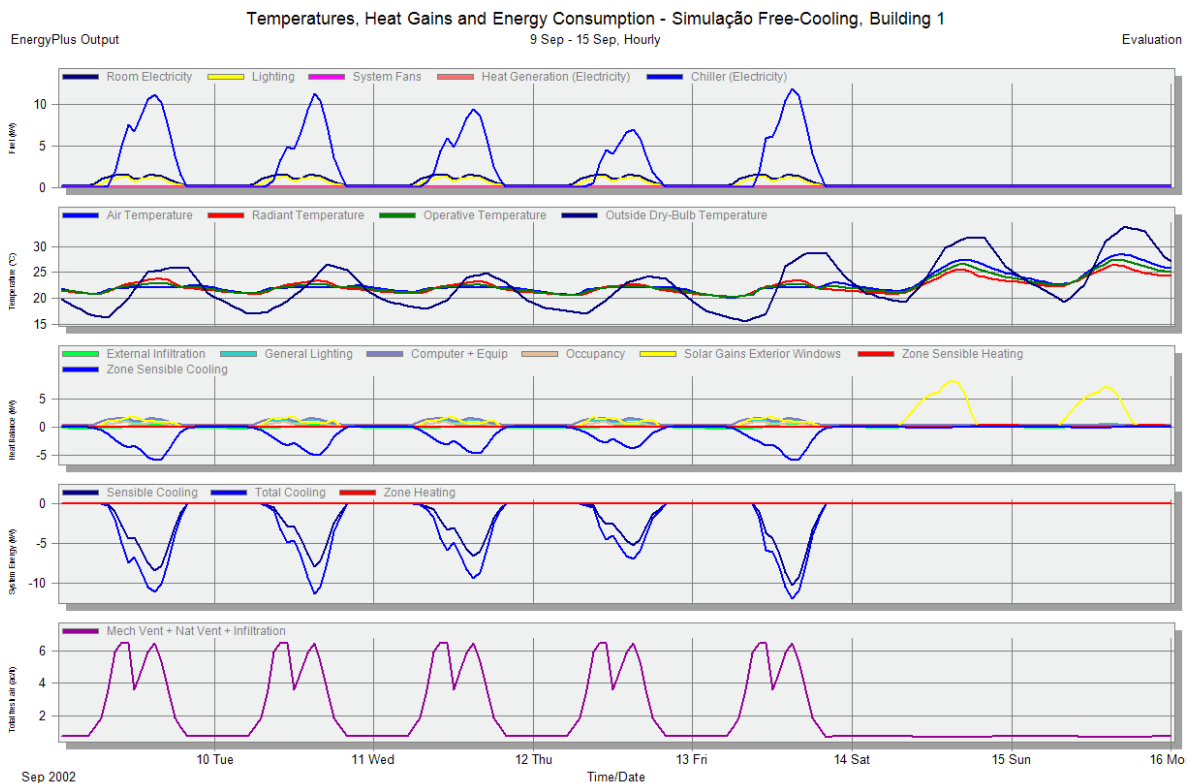


Figura 10 - Exemplo de gráfico de outputs do *DesignBuilder* retirado de uma das simulações desta tese.

A inclusão de *templates* permite o carregamento rápido de várias situações padrão, com edifícios, atividades, sistemas de AVAC e iluminação que podem ser assim rapidamente inseridas no projeto em curso. Pode-se também adicionar *templates* personalizados se o utilizador trabalhar em edifícios semelhantes. Este facto, combinado com a facilidade em importar dados em qualquer fase do estudo, permite que mudanças globais possam ser feitas ao nível do edifício, bloco ou zona.

O utilizador pode também controlar o nível de detalhe em cada modelo do edifício, podendo ser usada em cada fase do processo de *design* ou de avaliação. Finalmente é possível mudar da edição do modelo para a performance ambiental com um único clique, com a informação a ser exibida sem a necessidade de executar módulos externos ou importar dados e qualquer simulação necessária para gerar os dados são iniciadas automaticamente [24].

Este foi, como dito anteriormente, o *software* escolhido em detrimento de outros, pelo facto de apresentar uma alternativa ao *EnergyPlus*, mas ao mesmo tempo extremamente intuitivo, tendo para além disso uma versão IEE, como irá ser explicado mais à frente no capítulo 2.4.2.

• HAP

As aplicações possíveis para este *software* facilmente podem incluir projetos envolvendo:

- Pequenas e grandes superfícies comerciais
- Diversos tipos de sistemas CAV e VAV
- Pequenos e grandes escritórios, lojas, *shoppings*, escolas, igrejas, restaurantes, hotéis, hospitais, fábricas

Interface do HAP

O HAP usa uma interface gráfica do estilo Explorer para fornecer um rápido e eficiente acesso aos dados do projeto. Uma abordagem modular é usada para definir os componentes do edifício e os sistemas AVAC. Isso fornece uma grande flexibilidade para a configuração de dados para atender a uma ampla gama de aplicações [25].

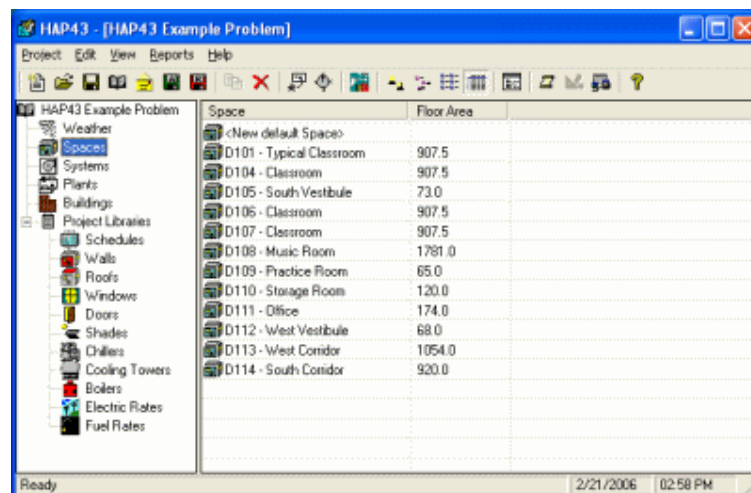


Figura 11 - Interface do HAP [25].

Para definir o espaço, temos o *Building Wizard*, útil para o *design* preliminar do projeto e aplicações de triagem. Normalmente, para definir o edifício, é necessário inserir características das paredes, teto e janelas são definidas primeiros, os espaços são inseridos, em seguida, um por um, no entanto, com o *Wizard* o utilizador primeiro descreve o tamanho e forma do edifício e o tipo de zona, depois disso, seleciona-se a parede, teto e janelas usadas, cargas internas e horários específicos para essas cargas. Finalmente, o *Wizard* automaticamente gera os dados para todos os espaços do edifício que foram descritos. Assim, todo o edifício pode ser definido rapidamente [25].

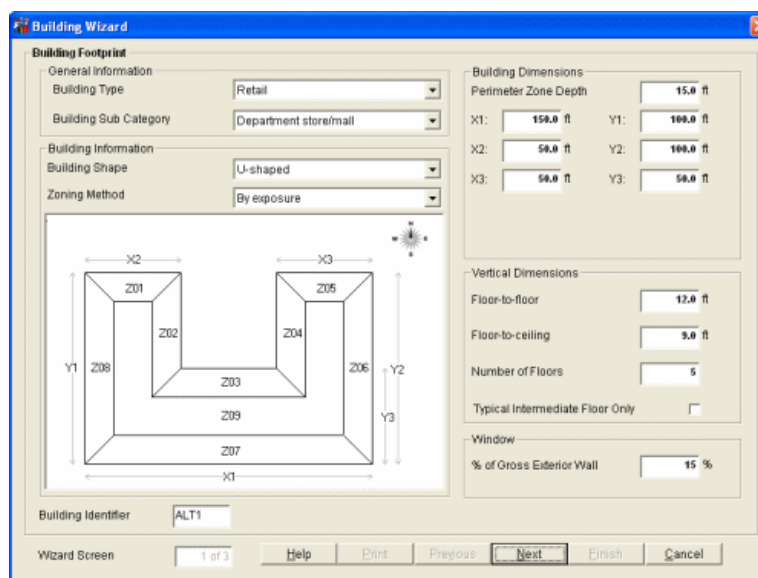


Figura 12 - Interface do *Building Wizard* [25].

• Análise energética

- O HAP realiza uma análise horária, usando dados climáticos para as 8.760 horas do ano para calcular as transferências de calor, as cargas e a operação do sistema de climatização.
- O consumo horário de energia pelos componentes AVAC (compressores, ventiladores, válvulas) fica tabulado para determinar o consumo energético total do edifício assim como o consumo diário ou mensal.
- Juntamente com o consumo, também é possível calcular o seu custo para cada tipo de fonte energética ou tipo de combustível.
- A análise energética reutiliza os dados de input utilizados no design do sistema, tipicamente 50% ou 75% dos dados energéticos são automaticamente preenchidos assim que o design está concluído.

Cálculos de carga

- Todos os cálculos para determinar cargas são feitos de acordo com o ASHRAE.
- Calcula no espaço e zona as cargas para cada hora do dia em todos os meses do ano. Ao fazê-lo calcula o fluxo de calor para todos os elementos como paredes, janelas, luzes, ocupantes, equipamento elétrico, etc.
- Considera qualquer horário operacional para o equipamento AVAC assim como para a ocupação [25].

• TRNSYS

O TRNSYS é um *software* extremamente flexível usado para simular o comportamento de sistemas transientes. Enquanto a grande maioria das simulações concentram-se em avaliar o desempenho de sistemas de energia térmica e elétrica, o TRNSYS também pode ser usado para modelar outros sistemas dinâmicos, tais como o fluxo de tráfego ou mesmo de processos biológicos.

Este apresenta uma forma diferente de definir o que se vai estudar, tornando a simulação de um sistema detalhado mais simples, fazendo-o com tubos e ligações entre componentes que existem num sistema real, estando os dados extraídos de um desses componentes graficamente ligados aos dados de outro [26].

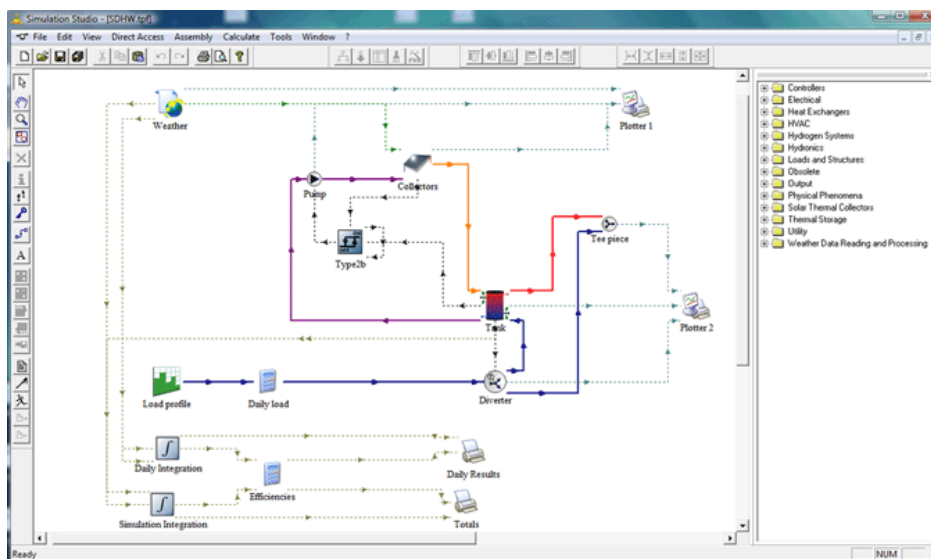


Figura 13 - Interface do TRNSYS [26].

O utilizador pode ver o valor de qualquer variável do sistema numa plataforma *online* à medida que a simulação decorre (qualquer temperatura, fluxo de calor, cargas, etc.). Finalmente, a maneira de retirar os dados do *software* também são variados, havendo uma grande flexibilidade ao integrar, imprimir e gerar relatórios de todos os outputs para cada componente.

O *TRNSYS* também permite ao utilizador desenhar edifícios com múltiplas zonas com o *TRNSYS3D*, que juntamente com o *TRNBuild*, é possível editar as paredes e as diferentes propriedades de cada camada desta, criar perfis de ventilação e infiltrações, adicionar ganhos, definir tetos e pisos radiantes e até posicionar ocupantes no edifício para calcular o conforto [26].

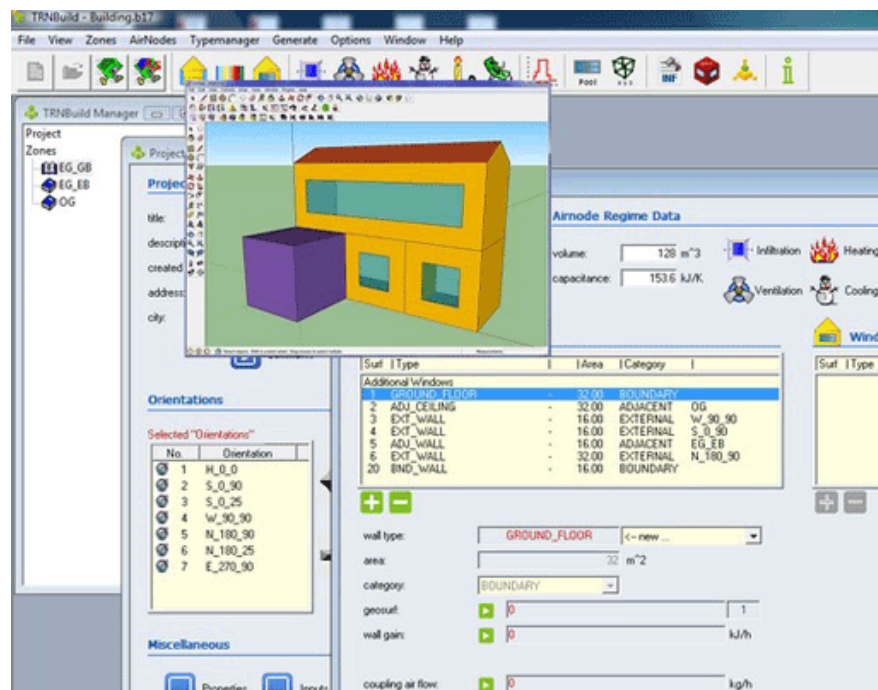


Figura 14 - O *TRNSYS3D* permite a criação do modelo do edifício, enquanto o *TRNBuild* define propriedades mais específicas dos materiais de construção assim como ganhos diversos [26].

Naturalmente, estes três *softwares* de simulação não são todos os que existem no mercado, mas são os que ao longo desta tese, entrei em maior contacto, tendo acabado por escolher o primeiro, *DesignBuilder*.

Abaixo apresenta-se uma tabela com um maior número de *softwares* de simulação energética de edifícios, estes encontram-se na tabela sem qualquer razão em específico. E, como se pode constatar, na grande maioria não são gratuitos o que limitou a escolha do *software* usado na tese, na fase anterior às simulações.

Tabela 1 - Lista de softwares de simulação dinâmica juntamente com as suas aplicações e se são gratuitos [27].

Software	Aplicações	Gratuito?
<u>ApacheHVAC</u>	Edifício, HVAC, simulação, performance energética	Não
<u>Autodesk Green Building Studio</u>	Modelação de edifícios, performance energética, DOE-2, EnergyPlus, CAD	Sim
<u>BSim</u>	Simulação de edifícios, energia, análise térmica e da humidade, condições do interior do edifício	Não
<u>BUS++</u>	Performance energética, ventilação, fluxo do ar, qualidade do ar interior, nível de ruído	Não
<u>Design Advisor</u>	Edifício, energia, conforto, ventilação natural	Não
<u>DeST</u>	Simulação do edifício, propriedades térmicas do edifício, temperatura, interface gráfica, cargas máximas	Sim
<u>DOE-2</u>	Performance energética, investigação, edifícios comerciais e residenciais	Não
<u>Energy Scheming</u>	Edifícios comerciais e residenciais, eficiência energética, cálculos de carga	Não
<u>ESP-r</u>	Simulação energética, performance ambiental, edifícios comerciais e residenciais, complexos residenciais	Sim
<u>MC4Suite 2009</u>	Projeto AVAC, dimensionamento, simulação energética, edifícios comerciais e residenciais	Não
<u>TRACE 700</u>	Performance energética, cálculos de carga, dimensionamento de equipamento AVAC, simulação energética, edifícios comerciais	Não

1.4.6 Análise económica

Uma análise económica de um sistema de arrefecimento gratuito envolve assumir um grande número de variáveis, como o tipo de ocupação, dimensão e tipo de construção do edifício, equipamento instalado, cargas térmicas, etc., ou seja, será necessário efetuar simulações computacionais que correlacionem todas estas variáveis com as condições exteriores definidas pelo clima.

Ainda assim, uma pesquisa feita pela *ID HVAC & Energy* [6], uma empresa britânica que atua na área dos sistemas AVAC, revela que com base numa análise do desempenho dos sistemas instalados nos seus clientes, pode-se estimar a poupança anual associada a sistemas e técnicas de arrefecimento gratuito em cerca de 6 €/m² (0.45£/ft²). Considerando um edifício com uma área climatizada de 2500 m², esta poupança resultaria em cerca de 15 000€/ano.

1.5 Contributo do trabalho desenvolvido

A área de AVAC, que engloba sistemas bastante abrangentes, utilizando princípios gerais de termodinâmica, mecânica dos fluidos e transferência de calor, por vezes denota algumas deficiências em matérias que se baseiam demasiado em experiência do próprio engenheiro do que em estratégias predefinidas e dados científicos.

Neste contexto, a principal contribuição da tese consiste no fornecimento de informação quantitativa, ainda que obtida por simulação computacional, que possa ser um ponto de partida na determinação do potencial do arrefecimento gratuito em variados tipos de edifícios de serviços e localizações.

Através de múltiplas simulações do mesmo edifício em diferentes tipos de ocupação, localização e inércia determina-se a diferença em termos de poupança energética primeiro sem qualquer tipo de arrefecimento gratuito, depois com arrefecimento gratuito com diferentes tipos de sensores. Investiga-se assim onde e em que condição pode-se obter um maior rendimento desta técnica de climatização.

Em termos mais específicos, antes de se implementar um sistema de arrefecimento gratuito num edifício de serviços localizado em Beja, poderá saber-se se essa instalação irá de facto ser benéfica em termos energéticos e conseqüentemente em termos de custos, ou não.

1.6 Organização da dissertação

Esta tese está dividida em seis capítulos. No segundo capítulo formula-se o problema apresentado na tese, explicando o funcionamento de um sistema de arrefecimento gratuito de uma maneira matemático, definindo-se também os tipos de arrefecimento gratuito que serão simulados e porquê.

No terceiro capítulo irão ser analisados todos os valores calculados e introduzidos no *DesignBuilder* fazendo-se também uma análise paramétrica pormenorizada, com o capítulo quatro a concluir as simulações propriamente ditas com os valores retirados destas, a sua análise e comparação consoante o tipo de arrefecimento gratuito usado.

No capítulo cinco, irá ser feita a mesma análise mas com um edifício modelado mais complexo, no fundo, um edifício mais “realista”, com várias zonas e múltiplos andares. Finalmente, no último capítulo conclui-se a tese com as ideias finais sobre o trabalho efetuado e uma pequena discussão sobre o que se poderá fazer em trabalhos póstumos.

1.7 Resumo

Neste capítulo redigiu-se uma revisão extensa dos conteúdos teóricos mais relevantes acerca do arrefecimento gratuito, como as principais fontes de arrefecimento natural, os diferentes tipos de sistemas, como estes funcionam assim como os *softwares* a utilizar na simulação destes. Para além disso apresentou-se uma análise económica deste tipo de sistema e como esta tese está apresentada. Em seguida, apresenta-se o problema em estudo em conjugação com o *software* utilizado, o *DesignBuilder*.

2. Formulação do problema e metodologia de análise

2.1. Sumário

Neste capítulo analisa-se a importância do conforto no arrefecimento gratuito, com o respetivo modelo matemático. Acrescenta-se uma breve análise às técnicas de arrefecimento gratuito passíveis de análise, isto é o processo de escolha entre as diferentes técnicas tendo em conta o *software* usado. Passa-se depois à definição do modelo no *DesignBuilder*, com o *layout* do edifício e todos os dados necessários à simulação, terminando na metodologia usada para cada uma dessas simulações.

2.1 Intervalo do arrefecimento gratuito - modelo matemático

2.2.1 Zona de conforto térmico

O potencial de um sistema de arrefecimento gratuito representa a medida da capacidade da ventilação para garantir o conforto dos ocupantes sem o uso de sistemas de arrefecimento mecânico, assim sendo, é importante começar o estudo desta técnica com a variável conforto.

O conforto térmico especifica um número de condições ou zonas de conforto onde 80% da população sedentária ou pouco ativa considera o ambiente termicamente aceitável. O ASHRAE Standard 55 indica as zonas de conforto para verão e inverno que correspondem para um vestuário de 0.5 e 0.9 clo, respetivamente. Estudos mostraram que a temperatura interior em edifícios climatizados é mantida em condições mais limitadas, com uma temperatura média de 23°C, com desvios de 1 a 1.5°C e mudanças de acordo com as estações de 0.5 a 1°C.

A figura 14 mostra uma comparação de zonas de conforto para as diferentes condições climáticas europeias. O intervalo de conforto em edifícios climatizados é comparado com o intervalo de conforto do ASHRAE e o padrão para ventilação natural.

De acordo com o conforto padrão para ventilação natural, a média de temperaturas interiores no verão são consideradas como sendo 25°C [28].

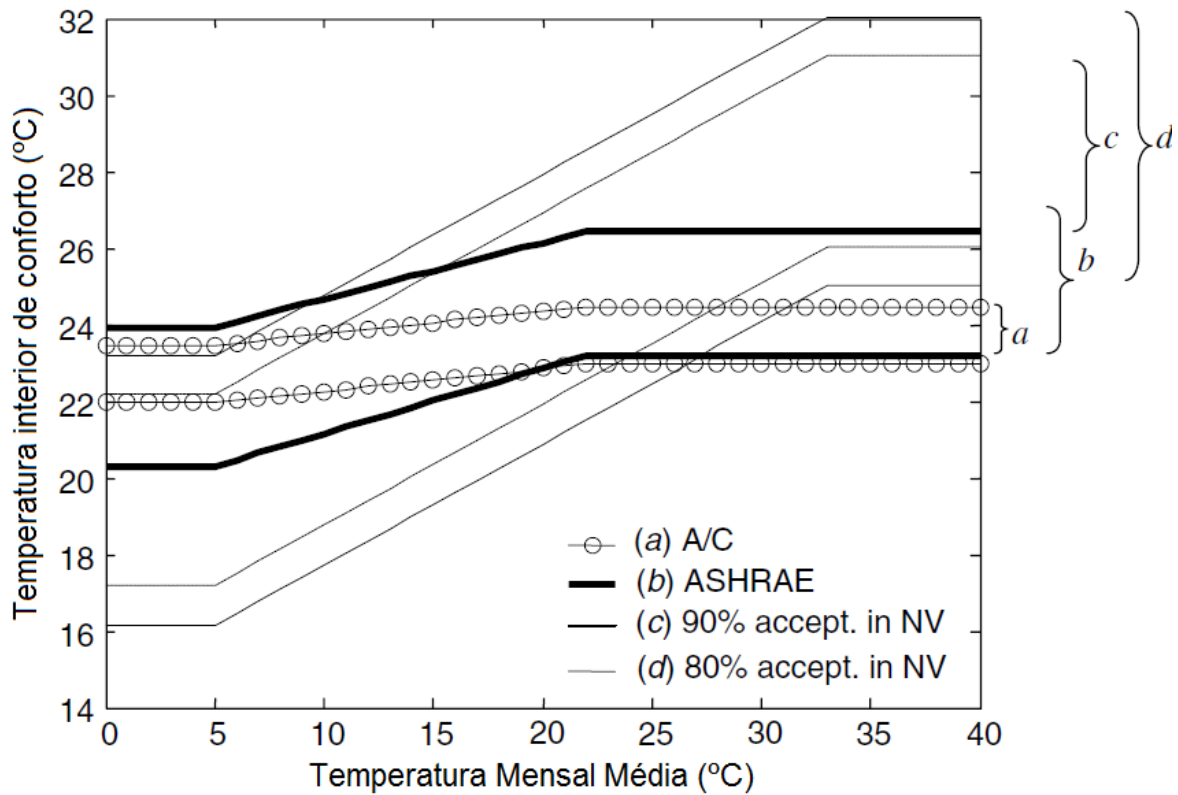


Figura 15 - Gama de conforto para ar condicionado e ventilação natural: a) Ar condicionado; b) Intervalo de conforto ASHRAE; c) Ventilação natural com limites de aceitação de 90%; d) Ventilação natural com limites de aceitação de 80% (Tabela 2) [28].

Tabela 2 - Zona de conforto [28].

	Média (°C)	Média Inverno (°C)	Média Verão (°C)	Gama de temp. (°C)	Mudança de estação (°C)
(a) Edifícios climatizados	23,0	22,5	23,5	1,5	1,0
(b) Zona de conforto ASHRAE	23,5	22,1	24,9	3,5	2,7
(c) Padrão para ventilação natural, 90%	23,9	19,5	25,0 máx. 28,3	5,0	8,8
(d) Padrão para ventilação natural, 80%	23,9	19,5	25,0 máx. 28,3	7,0	8,9

2.2.2 Equilíbrio térmico e temperatura interior sem sistema AVAC

De acordo com o ASHRAE uma maneira comum de comparar o consumo energético de edifícios é através de um método denominado de método *bin*. A estimativa dos graus-hora no método *bin* é feita usando o conceito de equilíbrio térmico. A temperatura de equilíbrio para o arrefecimento, T_b , é a temperatura exterior para a qual o edifício, tendo uma temperatura interior, T_{ls} , está em balanço térmico com o exterior [28]. Para esta temperatura, os ganhos de calor (solares, equipamento, etc.) são iguais às perdas de calor:

$$q_{ganho} = K_{tot}(T_b - T_{ls}) \quad (2.1)$$

Onde q_{ganho} são os ganhos de calor totais [W]; K_{tot} o coeficiente de perda de arrefecimento total do edifício; T_{ls} o limite superior da temperatura de conforto; T_b o temperatura de equilíbrio [K].

A temperatura do balanço térmico será então:

$$T_b = T_{ls} + q_{ganho} / K_{tot} \quad (2.2)$$

A taxa de energia necessária para o arrefecimento será então:

$$q_c = \begin{cases} K_{tot}(T_e - T_b), & \text{se } T_e > T_b, \\ 0, & \text{se } T_e \leq T_b, \end{cases} \quad (2.3)$$

Onde T_e é a temperatura exterior. A energia necessária para o arrefecimento é,

$$Q_c = \int_{t_{ini}}^{t_{fim}} K_{tot}(T_e - T_b)\delta_c dt \quad (2.4)$$

Onde δ_c é a condição para o arrefecimento,

$$\delta_c = \begin{cases} 1, & \text{se } T_e > T_b \\ 0, & \text{se } T_e \leq T_b \end{cases} \quad (2.5)$$

O equivalente do integral (5) é,

$$Q_c = \sum_i \sum_j K_{tot}(i, j)[T_o(i, j) - T_b(i, j)]\delta_c \Delta t(i) \quad (2.6)$$

Onde os índices dos somatórios i e j referem-se ao intervalo de tempo e a intervalos de temperatura exterior, respetivamente. Se o intervalo de tempo, $\Delta t(i)$, for de uma hora, o fator

$$dhc \equiv [T_e(i, j) - T_b(i, j)]\delta_c \Delta t(i) \quad (2.7)$$

É o grau hora para o arrefecimento, dhc . A expressão (2.7) tem a desvantagem de usar o conceito de equilíbrio de temperatura, o que implica que a temperatura interior está controlada e a um valor constante. Por outro lado, o T_{fr} ou a temperatura “livre” (*free-running*) é a temperatura do edifício quando nenhum sistema AVAC é usado, por sistema define-se como aquecimento, ar condicionado e ventilação para arrefecimento [28].

Do equilíbrio de temperaturas,

$$K_{tot}(T_{fr} - T_e) - q_{ganho} = 0 \quad (2.8)$$

Resulta a temperatura “livre”,

$$T_{fr} = T_e + \frac{q_{ganho}}{K_{tot}} \quad (2.9)$$

Ao substituir T_b na equação (2.7) pela expressão (2.2) e ao usar a equação (2.9), obtemos uma expressão equivalente para os graus-hora de arrefecimento:

$$dhc = (T_{fr} - T_{li})\delta c \quad (2.10)$$

Onde o T_{li} é a temperatura do limite inferior de conforto e a condição para o arrefecimento é,

$$\delta c = \begin{cases} 1, & \text{se } T_{fr} > T_{ls} \\ 0, & \text{se não ocorrer} \end{cases} \quad (2.11)$$

A carga de arrefecimento pode ser balanceada com o arrefecimento gratuito ou pela ventilação mecânica. Se a temperatura exterior, T_e , for mais baixa que o limite superior de conforto, T_{ls} , então o arrefecimento gratuito será possível. A condição para o arrefecimento gratuito será,

$$\delta fr = \begin{cases} 1, & \text{se } T_{fr} > T_{ls} \text{ e } T_e < T_{ls} \\ 0, & \text{se não ocorrer} \end{cases} \quad (2.12)$$

Resultando o grau-hora para o arrefecimento gratuito,

$$dhfr = (T_{fr} - T_{ls})\delta fr \quad (2.13)$$

Se arrefecimento for necessário, por exemplo se $T_{fr} > T_{ls}$, mas a temperatura exterior, T_e , for superior ao limite superior da temperatura de conforto, T_{ls} , então ventilação mecânica será necessária. A condição para essa mesma ventilação será,

$$\delta vm = \begin{cases} 1, & \text{se } T_{fr} > T_{ls} \text{ e } T_e \geq T_{ls} \\ 0, & \text{se não ocorrer} \end{cases} \quad (2.14)$$

Resultando o grau-hora para a ventilação mecânica,

$$dhvm = (T_{fr} - T_{ls})\delta vm \quad (2.15)$$

As condições expressadas nas equações (2.11), (2.12) e (2.13) são mostradas na figura 16. O intervalo de conforto está delimitado pelos seus valores superiores e inferiores, T_{li} e T_{ls} como mostrado na figura 15 e tabela 2. A temperatura “livre”, T_{fr} , pode ser mais alta ou baixa que a temperatura exterior, T_e , o arrefecimento gratuito é viável quando $T_{fr} > T_e$ (figura 16 (a)) [28].

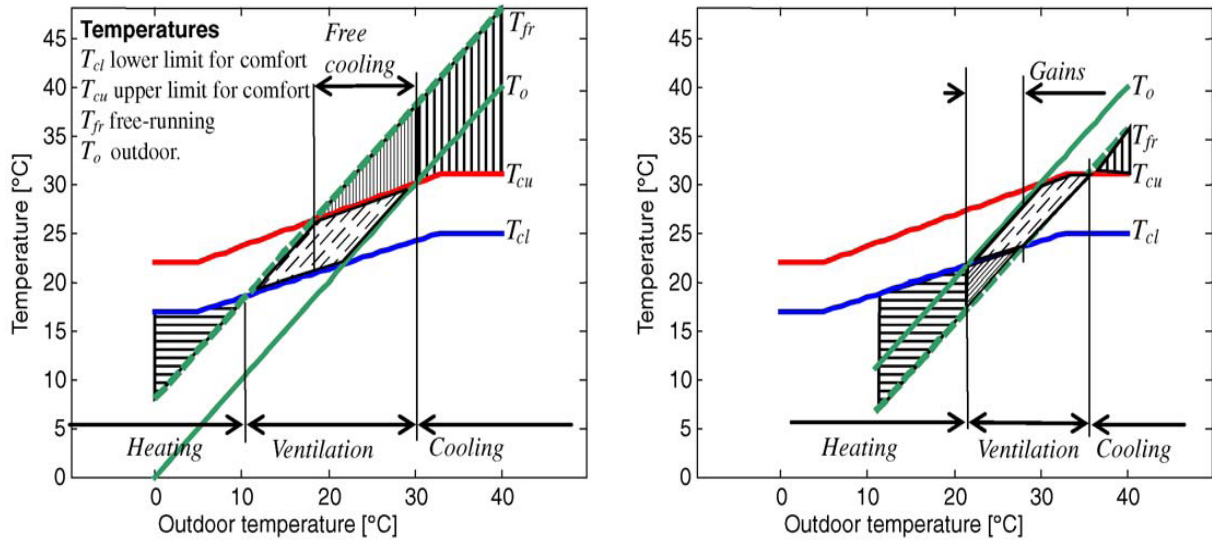


Figura 16 - Intervalos para aquecimento, arrefecimento gratuito e ventilação mecânica quando a temperatura “livre” é (a) mais alta e (b) mais baixa que a temperatura exterior [28].

2.3 Técnicas de arrefecimento gratuito passível de análise

Antes de começar as simulações no *DesignBuilder*, é necessário definir que tipo de técnicas se vai analisar, quais as possíveis e quais o *software* não está preparado para simular.

Entre as técnicas inicialmente consideradas estão as seguintes:

- Ventilação noturna
- Arrefecimento evaporativo
- Água profunda de lago

Para além destas inclui-se o arrefecimento gratuito que o *DesignBuilder* simula diretamente, isto é, uma simulação padrão que também será analisada. De acordo com o manual do *software*, arrefecimento gratuito é controlado por um economizador que atua como válvula que insufla 100% de ar novo quando o ar exterior está a uma temperatura inferior à do interior do edifício.

Das técnicas acima definidas três destas, nomeadamente o arrefecimento evaporativo e a água profunda de lago, foram excluídas devido à incapacidade do *software* de fazer a sua simulação, embora essa simulação seja possível num futuro próximo, de acordo com o fórum do próprio *DesignBuilder*.

2.4 Simulação do sistema AVAC

Para simular um sistema AVAC será necessária uma miríade de *inputs*, entre estes o próprio edifício. Neste capítulo definir-se-á todos os dados inseridos no *DesignBuilder*, excluindo os que se consideram como sendo os mais importantes, esse irão ser retratados no capítulo 3.2.1.

Toda a informação necessária está separada por tipo de dados do modelo, estando de uma maneira generalizada separado por *layout*, onde se insere o desenho do próprio edifício; atividade (*activity*); construção (*construction*); aberturas (*openings*); iluminação (*lighting*) e AVAC.

Todos estes valores são baseados no RCCTE ou então por escolhas feitas a pensar no objetivo final desta tese, descobrir o impacto do arrefecimento gratuito num edifício, evitando dispersar para outros temas que acabam por ser secundários.

2.4.1 Modelo do edifício



Figura 17 - Edifício simulado, visto aqui renderizado no *DesignBuilder*.

Este capítulo engloba todo o processo de definição do edifício em si, excluindo os sistemas de AVAC e as condições climatéricas ou qualquer outra influência externa.

Primeiro, o desenho do edifício em si define-se pela sua simplicidade: uma estrutura quadrangular, com lados externos com 10.5 metros de comprimento, 3.5 metros de comprimento e uma área interior de 100 m². Possui uma porta, virada a norte e duas janelas idênticas em termos de dimensões, uma virada a oeste e outra a sul.

A razão pela total falta de complexidade no *design* explica-se pela necessidade de tornar as simulações mais simples e concisas, concentrando a análise nos *inputs* mais importantes para uma correta simulação das diferentes técnicas de arrefecimento gratuito e não no edifício em si.

No entanto numa segunda análise, no capítulo 5, irá ser criado um segundo edifício mais complexo, para confirmar, ou não, os resultados obtidos nesta primeira fase.

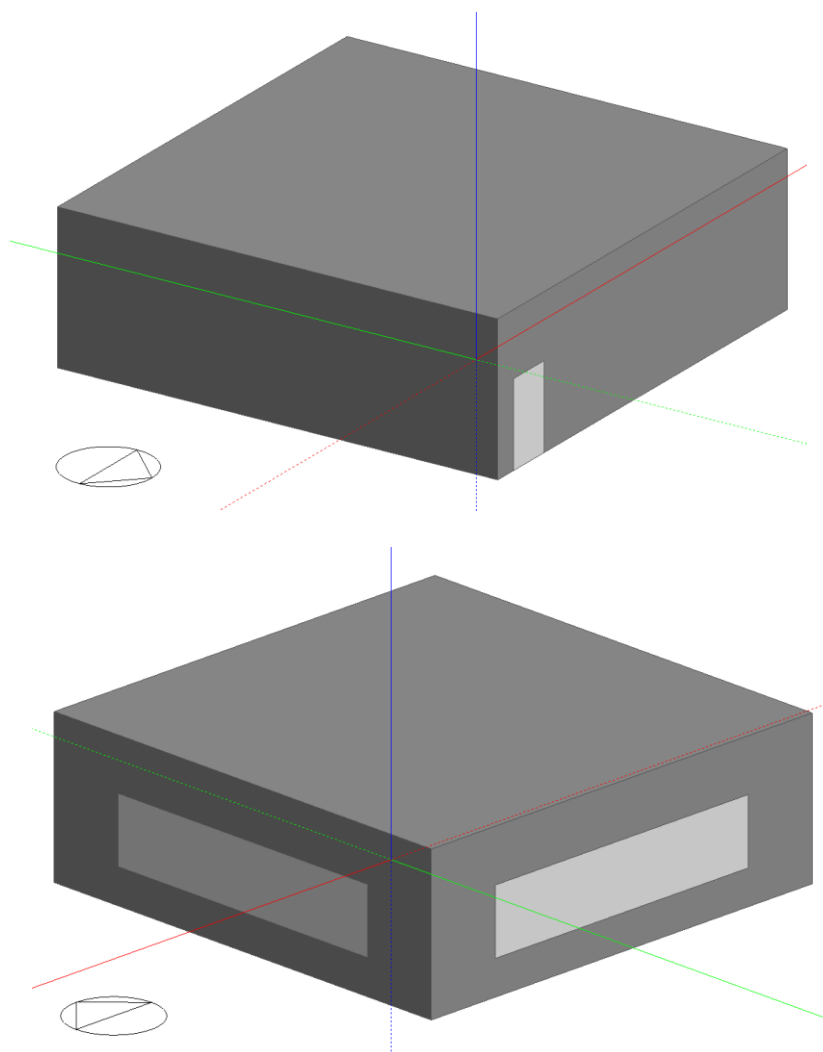


Figura 18 - Edifício visto como visto no *DesignBuilder* (*layout*). *Acima* - Lado Norte (ver canto inferior esquerdo), com uma porta, e o lado Este. *Abaixo* - Lados Sul e Oeste do edifício, ambos com uma janela ao longo do comprimento da parede.

A direção do edifício também tem importância pois propositadamente colocou-se as janelas viradas a sul e Oeste. Deste modo a carga solar será maior, podendo assim o arrefecimento gratuito ter um impacto maior na poupança energética.

2.4.2 Atividade – *Activity*

O tipo de dados que recai sobre *activity* baseia-se no fundo no tipo de ocupação e no controlo ambiental. Em relação ao tipo de ocupação, este define o número de pessoas que ocupam o espaço em determinados períodos de tempo (uma análise mais aprofundada deste input será feita no capítulo posterior). Estes dados são usados nas simulações e nos cálculos de necessidades de arrefecimento juntamente com o output de calor proveniente do metabolismo dos ocupantes.

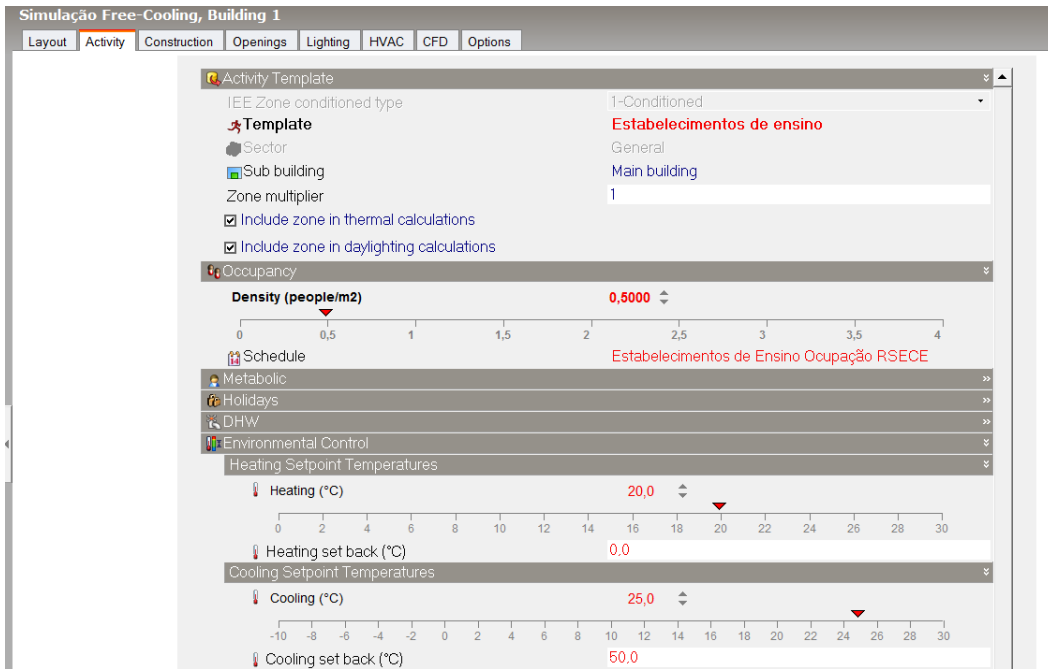


Figura 19 - Activity como visto no DesignBuilder.

Na ocupação ou *occupancy* como visto na figura 19 começamos por definir a densidade, isto é, o número de pessoas por área de espaço total. Os valores escolhidos para a densidade foram retirados do RSECE, como visto na tabela seguinte:

Tabela 3 - Valores para densidade e radiação proveniente dos equipamentos, consoante retirado do RSECE.

Tipo de atividade	Densidade [m ² /Ocupante]	Equipamento [W/m ²]
Cinema	2	2
Sala de Aula	10	5
Escritório	15	15

Para a densidade passar das unidades fornecidas pelo RSECE às usadas no *DesignBuilder* (ocupante/m²), simplesmente fez-se o inverso desses valores, chegando aos de densidade 0.5 ocupante/m² para o cinema, considerando-se 0.1 m²/pessoa tanto para a sala de aula como para o escritório, embora para o escritório seja um valor aproximado.

Temos também os ganhos de calor provenientes dos equipamentos usados, para o caso do escritório, o valor definido no RSECE é de 15 W/m², no caso da sala de aula o valor será de 5 w/m² e no do cinema será 2 W/m².

Naturalmente, a ocupação não é um valor constante ao longo do dia, vai-se alterando à medida que nos aproximamos das horas noturnas quando a ocupação será zero.

Para determinar a ocupação exata a cada hora do dia temos o horário (*schedule*). O horário atribui valores para diferentes horas do dia que serão então multiplicados pela densidade definida, podendo esse valor ser zero, por exemplo, para os fins-de-semana, feriados ou férias.

Os valores do horário, assim como outros valores padrão como o metabolismo ou os ganhos de calor através de equipamentos são definidos pelo *template* escolhido. Cada *template*, através do tipo de edifício pretendido, define todos os valores de acordo com o módulo IEE, o módulo principal da versão portuguesa do *DesignBuilder*, um motor de cálculo específico para resultados portugueses.

O módulo IEE permite utilizar a caracterização do edifício inerente à construção do modelo e os resultados da simulação dinâmica detalhada, para calcular diversos parâmetros relevantes no âmbito do DL 79/2006. Isto significa que não é essencial definir todos os valores, sendo que neste caso, o que se alterou foi a densidade, o calendário de feriados e férias para o caso da sala de aula e escritório, reduzindo-se também o ar fresco mínimo, uma constante, para zero, sendo este definido no próprio sistema AVAC.

Outro valor importante é o *Heating setpoint temperature*, que define a temperatura ideal no espaço, especificamente quando aquecimento será necessário. Já o *Cooling setpoint temperature* é o oposto, definindo a temperatura em que o arrefecimento do espaço será necessário. Neste caso será 20 e 25 °C, mantendo o edifício dentro de temperaturas padrão de conforto. Já o *Heating set back* e o *Cooling set back* definem a altura em que a ventilação natural funciona, neste caso, os valores foram deixados de acordo com o *template* escolhido, uma vez que escolheu-se não usar ventilação natural, exceto para o caso da ventilação noturna, como explicado no capítulo 4. A seguinte lista enumera como cada valor influencia a ventilação mecânica e natural:

- **Valor de set back igual a 0:** Ventilação natural/mecânica apenas opera quando Temp. Exterior < Temp. Interior
- **Valor de set back igual a -50:** Ventilação natural/mecânica não é definida pela diferença de temperaturas exterior e interior
- **Valor de set back igual a 2:** Ventilação natural/mecânica não é definida pela diferença de temperaturas exterior e interior

Mais uma vez é importante notar que estes valores apenas serão importantes para a ventilação noturna, uma vez que o tipo de simulação será diferente [29].

2.4.3 Aberturas – Openings

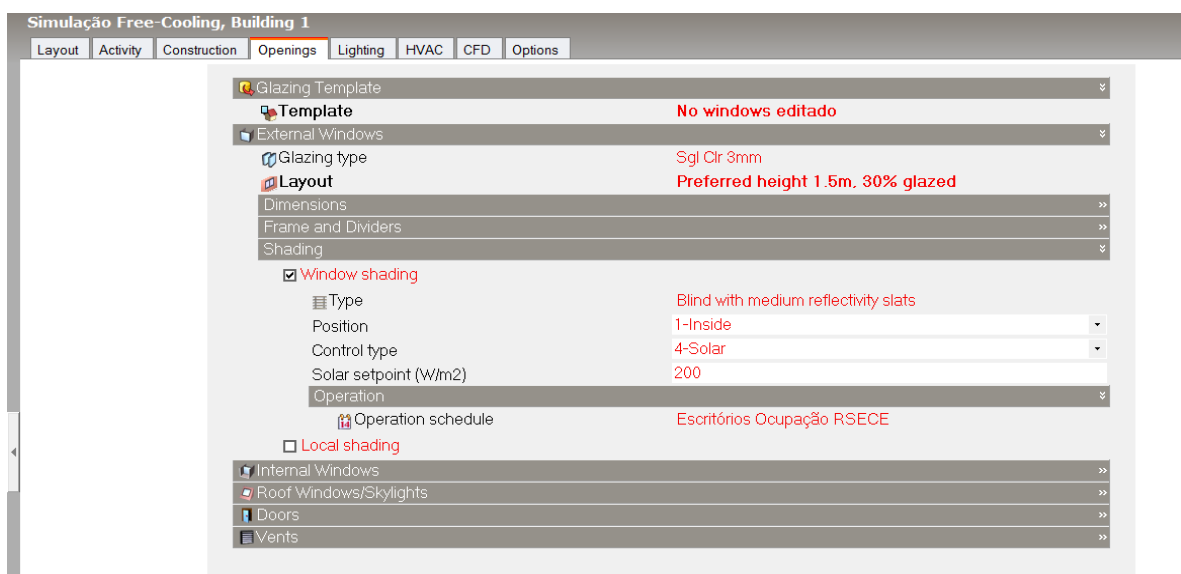


Figura 20 - Openings como visto no *DesignBuilder*.

Nesta fase da construção do modelo definimos os tipos de aberturas, definindo essencialmente as janelas. Normalmente as janelas são definidas automaticamente, assumindo uma percentagem de parede definida para esse propósito, no entanto, para ser possível desenhar janelas personalizadas, deve-se retirar os *templates* e fazer as aberturas no próprio desenho de edifício, ou seja, no *layout*.

Nos restantes dados, o mais importante será o *shading*, onde definimos o tipo de dispositivo usado no sombreamento e como será instalado. Uma persiana pode estar posicionada de quatro formas diferentes:

- a. **Dentro:** A persiana estará posicionada no interior da zona.
- b. **Entre a zona envidraçada (Mid-pane):** A persiana estará colocada entre o vidro interior um segundo vidro.
- c. **Fora:** A persiana coloca-se no exterior.
- d. **Posição variável:** Esta opção só é possível com vidros eletrocromáticos, capazes de aumentar ou diminuir a sua transparência, respondendo a inputs externos como a temperatura ou luz solar.

Para além da posição do dispositivo de sombreamento, temos também o seu tipo de controlo (*control type*), que define como este será usado. Assume-se que quando o controlo estiver “ligado”, a persiana cobrirá toda a janela, quando estiver “desligado” assume-se que não cobrirá a janela (estando “ligado” ou “desligado” o dispositivo não cobrirá qualquer área da parede onde a janela está instalada) [29].

As escolhas para o tipo de controlo são múltiplas, mas as que se consideram como sendo as mais importantes serão as seguintes:

- a. **Sempre ligado (Always on):** O sombreamento estará sempre ligado.

Os cinco tipos de controlo seguintes são usados principalmente para reduzir a carga proveniente dos ganhos solares.

- b. **Horário (Schedule):** O uso do sombreamento é definido apenas por um horário.
- c. **Solar:** Sombreamento está ligado se a radiação solar incidente sobre a janela excede o *setpoint* definido abaixo, como visto na figura 20 (W/m^2 ou $BTU/hr-ft^2$).
- d. **Clareza (Glare):** O sombreamento será ligado se o total da clareza da luz solar detetada por sensores em todas as janelas do edifício for superior ao máximo definido por zona (controlo de clareza requer controlo de iluminação interior).
- e. **Temperatura do ar exterior:** O sombreamento será ativado se a temperatura exterior exceder um *setpoint* definido.
- f. **Temperatura do ar interior:** O sombreamento será ativado se a temperatura interior exceder um *setpoint* definido.
- g. **Arrefecimento (Cooling):** Sombreamento estará ligado se a taxa de arrefecimento no ponto anterior for diferente de zero [29].

A opção escolhida neste caso foi a solar, outra opção das descritas acima seriam igualmente viáveis, no entanto, mais uma vez, para não tentar dispersar o objetivo principal da tese, definiu-se o tipo de controlo solar como sendo o mais apropriado tendo em conta a simplicidade, para além disso definiu-se o *setpoint* como sendo $200W/m^2$, um valor médio de radiação solar de acordo com o RCCTE.

2.4.5 Iluminação – Lighting

No *lighting* ou iluminação, mais uma vez, é possível definir o tipo de uso de luz elétrica no edifício a partir de *templates*. Neste caso o *template* escolhido foi o padrão, pois os valores a serem editados não são numerosos como em outros tipos de dados como na atividade por exemplo.

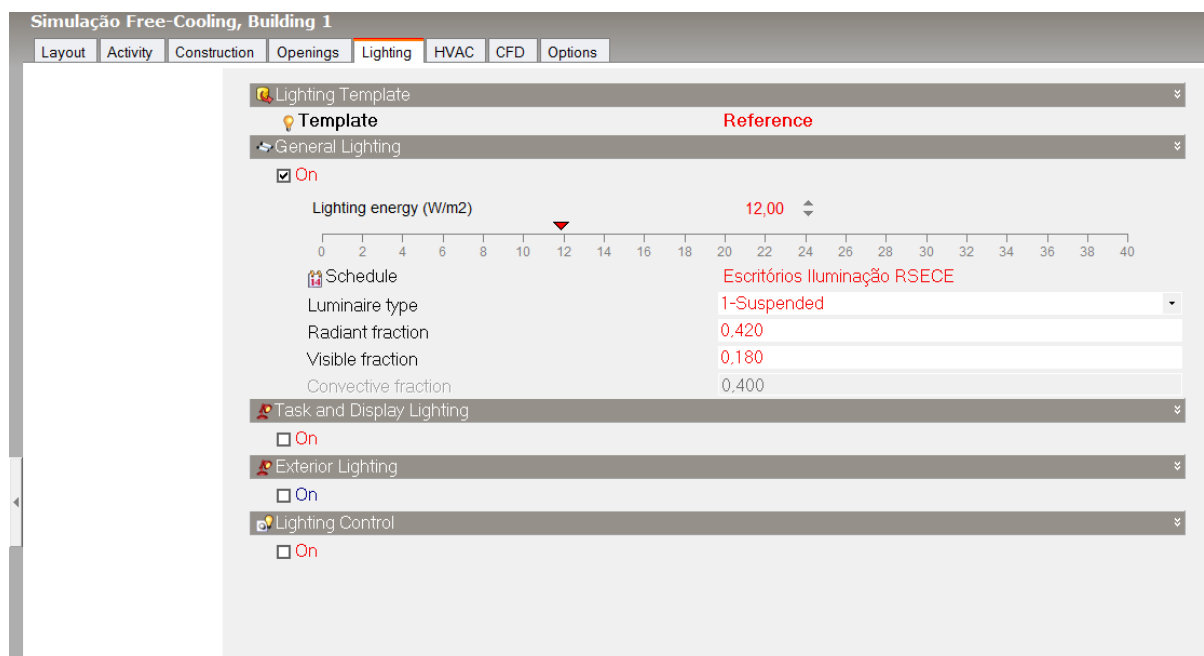


Figura 21 - *Lighting* como visto no *DesignBuilder*.

Começa-se pela energia de iluminação onde definiu-se como tendo o valor de 12 W/m², que com o intuito de simplificar as simulações usou-se como valor para todos os tipos de edifícios estudados na tese. Já o horário escolhido foi o padronizado de acordo com o RSECE para cada uma das designações do edifício, seja ele para uma sala de aula, cinema ou escritório.

Finalmente o tipo de luminária escolhida foi a suspensa que encontra-se totalmente dentro da zona simulada, para que todo o ganho proveniente da iluminação se confinasse na zona estudada. Os restantes dados são inseridos automaticamente pelo *template* escolhido, como a fração radiante (*radiant fraction*) e a fração visível (*visible fraction*) que define a fração de calor transmitido para o espaço através da iluminação.

2.4.6 AVAC

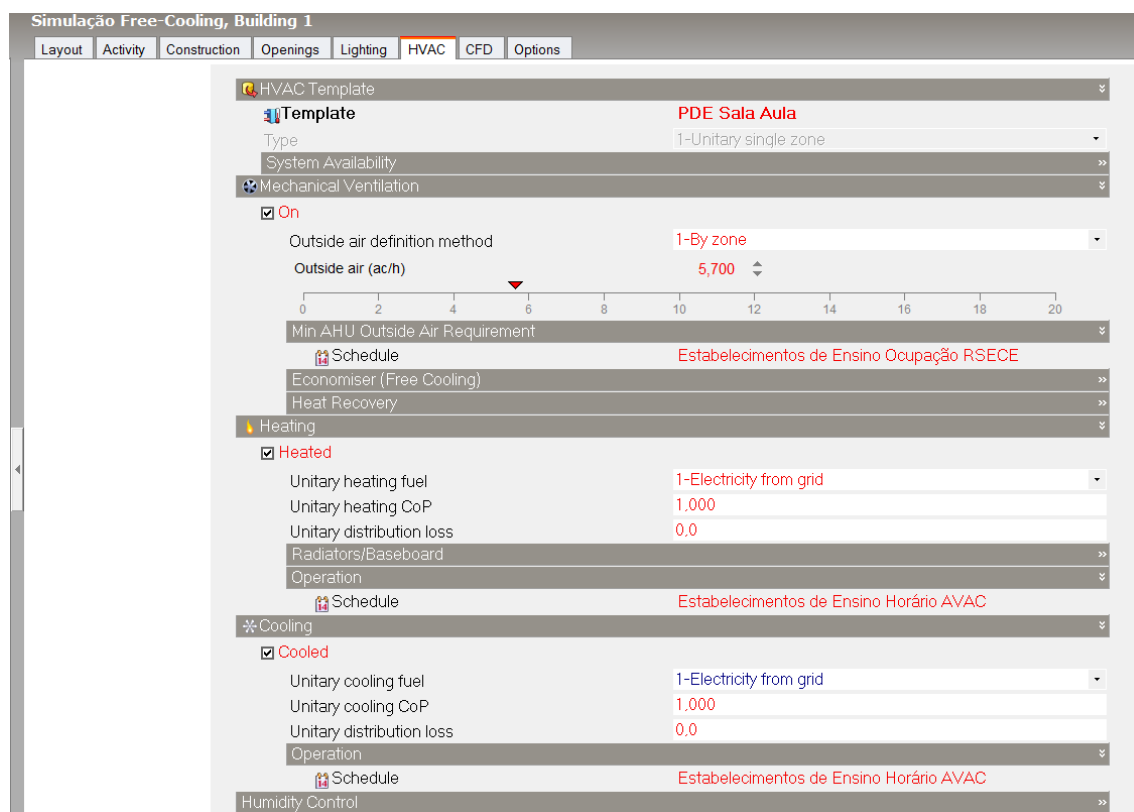


Figura 22 - HVAC como visto no *DesignBuilder*.

A definição do sistema AVAC ou HVAC começa, como sempre, pelo *template* escolhido, neste caso, o *template* “PDE Sala de Aula”. Este é editado a partir de um sistema *Packaged direct expansion*, PDE, ou uma unidade compacta de expansão direta.

Neste tipo de sistema AVAC, o evaporador está em contacto direto com o fluxo de ar, assim, a serpentina de arrefecimento no circuito de ar é também o evaporador do circuito de refrigeração. O termo “direto” refere-se à posição do evaporador em relação ao circuito de ar.

O termo “expansão” refere-se ao método usado para introduzir o refrigerante na serpentina de arrefecimento. O refrigerante líquido passa através de um dispositivo de expansão (usualmente uma válvula) mesmo antes de entrar na serpentina. Este dispositivo reduz a pressão e a temperatura do refrigerante até a um ponto onde é mais frio do que o ar que atravessa a serpentina.

Os componentes do PDE (evaporador, compressor, condensador, válvulas e até mesmo algumas unidades de controlo) podem estar construídas juntas, o que proporciona uma maior facilidade de montagem e manutenção. Por outro lado, os componentes do circuito de refrigeração podem estar separados, proporcionando um aumento de flexibilidade no *design* do sistema.

Uma das razões mais comuns para usar este tipo de sistema, especialmente a versão compacta, é a de que num edifício mais pequeno, este frequentemente tem o custo mais reduzido de instalação do que um sistema de refrigeração a água, pois requer menos mão-de-obra a montá-lo e tem menos materiais para instalar [30].

Finalmente, um sistema AVAC deste tipo que use condensadores refrigerados a ar pode ser colocado acima do edifício, num pequena sala de equipamentos, ou mesmo dentro do perímetro da parede do edifício, quando assim é, o PDE só vai fazer recirculação de ar, sendo necessário um outro sistema para fornecer ar novo ao edifício. Para além disso, usando múltiplos PDEs, um maior controlo do consumo de energia é possível, pois cada um deles só climatizaria uma só zona [30].

Essa característica de climatizar uma única zona, no caso do edifício escolhido para a simulação acaba por ser irrelevante, visto que este tem de facto, uma só zona. Para além disso, neste sistema é mais simples de editar o CoP do que nos outros, sendo que o CoP usado, foi de um, simplesmente para determinar uma relação direta entre este valor e o consumo energético.

• Ventilação mecânica

Esta função do HVAC controla a quantidade de ar fresco que entra no edifício ou renovações de ar por hora (ac/h ou RPH), ou seja, quantas vezes por hora todo o volume de ar no interior do edifício é renovado.

Considerando uma sala de aula, cinema ou escritório como sendo uma sala de assembleia, retirou-se do RSECE um valor de caudal mínimo de ar novo de $20 \text{ m}^3/(\text{h.m}^2)$. Isto porque, apesar de se poder retirar valores da tabela para os casos específicos, estes não seriam fixos pois dependeriam do número de ocupantes a cada dado momento (figura 23).

ANEXO VI
Caudais mínimos de ar novo

Tipo de actividade		Caudais mínimos de ar novo	
		[m ³ /(h.ocupante)]	[m ³ /(h.m ²)]
Entretenimento	Corredores/átrios		5
	Auditório	30	
	Zona do palco, estúdios	30	
	Café/foyer	35	35
	Piscinas		10
	Ginásio	35	
Serviços	Gabinets	35	5
	Salas de conferências	35	20
	Salas de assembleia	30	20
	Salas de desenho	30	
	Consultórios médicos	35	
	Salas de recepção	30	15
	Salas de computador	30	
Elevadores		15	
Escolas	Salas de aula	30	
	Laboratórios	35	
	Auditórios	30	
	Bibliotecas	30	
	Bares	35	

Figura 23 - Tabela de valores de caudais mínimos de ar novo retirada diretamente do RSECE [20].

Após ter sido definido o valor para o caudal mínimo, teve que se proceder a um cálculo simples para determinar o valor de renovações horárias a inserir no *DesignBuilder*.

$$\text{Caudal de ar mínimo novo} = 20 \text{ m}^3 / (\text{h} \cdot \text{m}^2)$$

$$\text{Área do piso} = 100 \text{ m}^2$$

$$\text{Volume do espaço} = 100 \times 3,5 = 350 \text{ m}^3$$

$$\text{Caudal a inserir no Design Builder} = \frac{20}{350} \times 100 = 5,7 \text{ ac/h (ou 5,7 RPH)}$$

Esta função normalmente não é usada, mas visto que um sistema PDE apenas recircula o ar interior do edifício, este método será necessário. Este tipo de controlo seria possível ainda na fase de *Activity*, visto no capítulo 2.4.2, através de uma função não usada na simulação denominada de *Minimum fresh air*, que determina a entrada de ar novo relativamente à ocupação ou área, em l/s-ocupante e l/s-m² respetivamente.

Esse método não foi escolhido pois considerou-se que a quantidade de ar novo introduzido seria demasiado grande usando valores retirados do Anexo VI do RSECE tendo em conta o espaço, para além disso, estando o controlo no próprio sistema de climatização, evita possíveis erros de simulação ou incompatibilidades inerentes ao *software*.

É necessário também definir o método usado no controlo do ar novo fornecido, ou renovações de ar horárias (em ac/h), tendo sido escolhido um valor fixo para a zona. Todas as outras opções foram descartadas, pois os valores iriam depender do *Minimum fresh air*.

Em seguida temos as horas de funcionamento da UTA ou unidade de tratamento de ar (AHU), que irá controlar o fornecimento de ar novo, como visto anteriormente, determinando quando o sistema funciona, multiplicando valores padrão do RSECE pelo valor de renovações horárias.

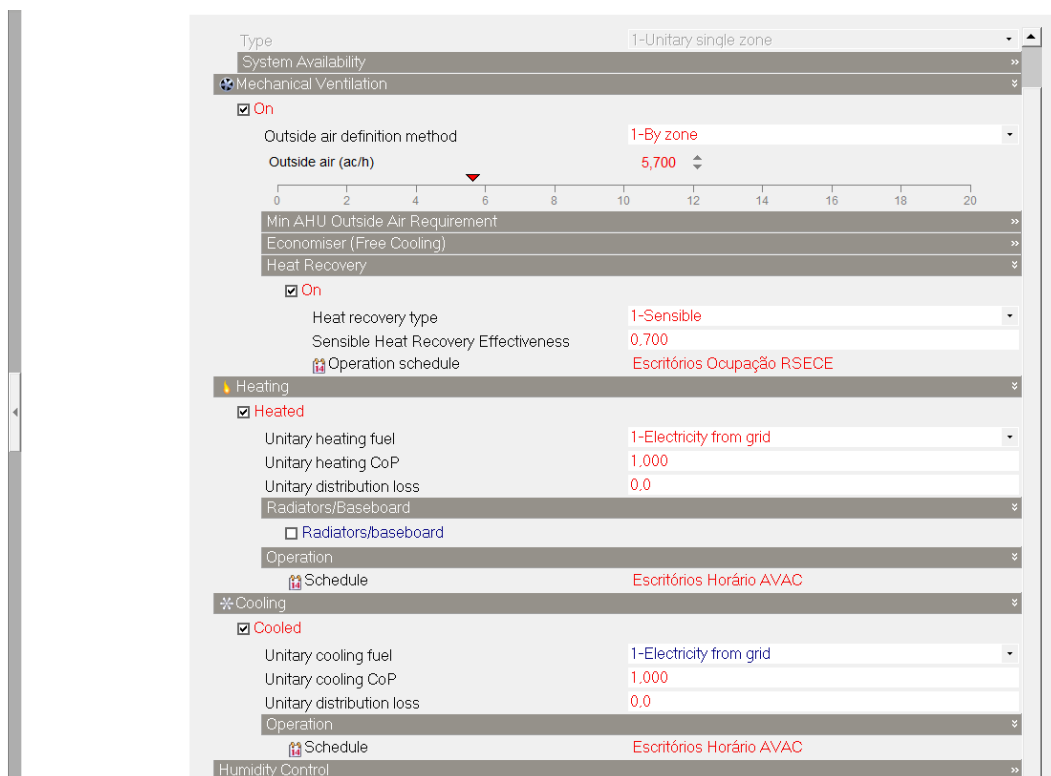


Figura 24 - HVAC como visto no *DesignBuilder*, com especial destaque no *Heat Recovery*.

• Recuperador de calor, aquecimento e arrefecimento

Heat recovery ou recuperador de calor é essencialmente um permutador com o propósito especial de recuperar calor residual do ar que sai para o exterior. No caso do *DesignBuilder* é possível especificar o tipo de recuperação de calor que está disponível entre o ar exterior insuflado e de saída, estes podem ser *sensible* (recupera calor sensível) ou *enthalpy* (recupera calor sensível e latente), neste caso foi selecionado o *sensible* pois achou-se que seria o suficiente para justificar o uso do recuperador de calor, visto que este não terá grande influência neste estudo uma vez que as simulações mais preponderantes irão ocorrer no período de verão.

Para além disso temos a *sensible heat recovery effectiveness*, que define a eficiência do recuperador, é válida para todas as condições, sendo o valor padrão 0.7. Deixou-se esse valor de maneira a deixar um recuperador totalmente definido, não porque fará parte fulcral da análise do arrefecimento gratuito, mas sim porque este normalmente está inserido em sistemas de climatização.

Já em relação ao *Heating* e *Cooling*, ou seja, os sistemas de aquecimento e arrefecimento, estes estão também definidos de uma maneira padronizada, usando eletricidade como fonte de energia e um CoP igual a um para facilitar futuros cálculos e da mesma forma. Tudo isto seguindo o mesmo raciocínio acima, onde o que não é essencial para as simulações deixa-se com valores simples ou padrão para maior rapidez.

• Tipo de sensor – sistema de arrefecimento gratuito

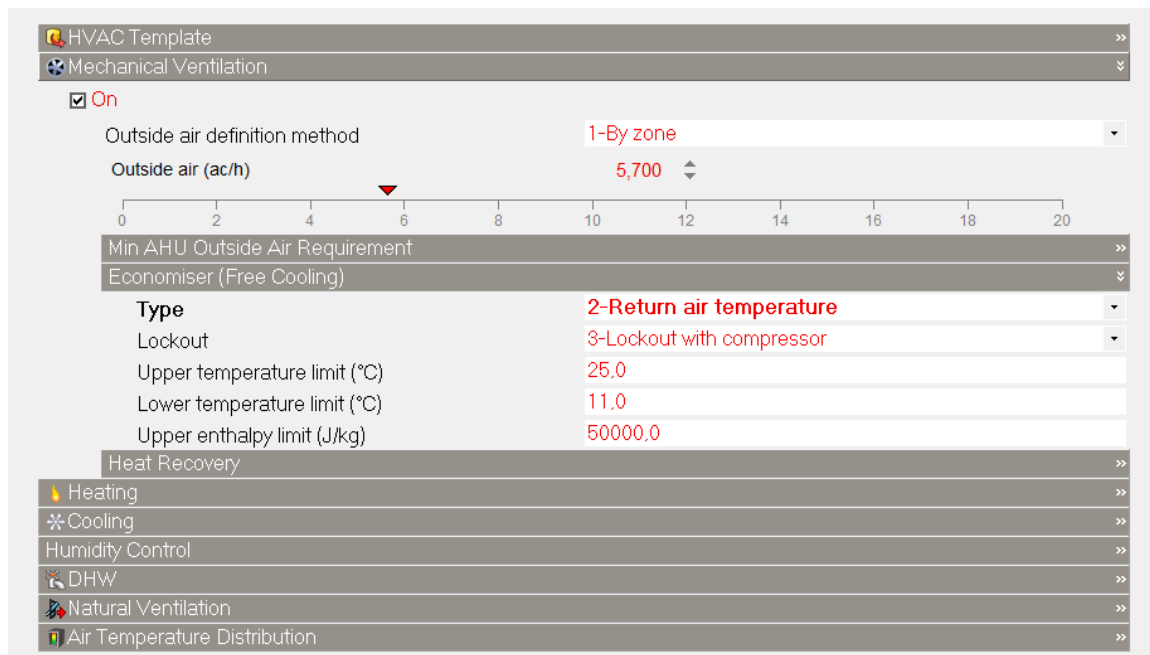


Figura 25 - Opções do sistema de arrefecimento gratuito como visto no HVAC do *DesignBuilder*.

O tipo de sensor usado no sistema de arrefecimento gratuito determina quando será necessário ligar o sistema. Como podemos ver pela figura 25, existem três tipos de sensor, o que é influenciado pela temperatura interior, o pela entalpia e por ambos simultaneamente.

O sensor será a última variável a considerar nas simulações de acordo com a metodologia que irá ser apresentada no capítulo seguinte.

No *DesignBuilder* é possível definir as condições em que o arrefecimento gratuito funciona a partir das seguintes quatro opções (figura 25):

- **Nenhum (None):** Quando o sistema não está ligado e o ar fresco exterior é baseado no ar trazido pela ventilação mecânica associada ao horário de utilização.
- **Temperatura do ar de retorno (Return air temperature):** estabelece um controlo limite na temperatura do ar de retorno para que quando a temperatura do ar que entra é maior que a de retorno, o fluxo de ar de entrada é reduzido a um mínimo.
- **Entalpia do ar de retorno (Return air enthalpy):** estabelece um controlo limite na entalpia do ar de retorno para que quando a entalpia do ar que entra é maior que o do ar de retorno, o fluxo do ar de entrada é reduzido a um mínimo.
- **Temperatura e entalpia do ar de retorno (Return air temperature and enthalpy):** quando ambos os limites acima descritos estão a ser usados, ou seja, quando a temperatura ou a entalpia do ar de entrada são maiores que as do ar de retorno, o fluxo do ar de entrada é reduzido a um mínimo.

Para além das opções acima, também é possível no *DesignBuilder* definir limites absolutos de temperatura e entalpia do ar exterior. Quando as condições do ar vão para além desses limites previamente estabelecidos, o fluxo de ar de entrada é reduzido a um mínimo, no entanto, não esquecer que o recuperador de calor pode estar ativo se possível [29].

Nas simulações, todas estas opções irão ser exploradas sendo que, excetuando quando o arrefecimento gratuito não está a ser simulado, os valores limite para a temperatura serão 25°C e 11°C, valores esses retirados do capítulo 2.2 com o intuito de manter o conforto no interior do edifício mesmo em condições limite.

Já em relação à entalpia, que será 50000 J/Kg, deixou-se o valor do *template*, uma vez que o *software* define todos os seus valores de acordo com o módulo IEE.

2.5 Metodologia de análise

Com todos os valores importantes inseridos, é necessário agora definir como se irão proceder às simulações. De acordo com a figura 26, começa-se pelas localizações, onde a simulação irá ocorrer; definindo depois o tipo de inércia, forte ou fraca; se o sistema de arrefecimento gratuito está ativado ou não e caso esteja, define-se então o tipo de sensor usado, se este funciona de acordo com a temperatura detetada, pela entalpia ou então ambos.

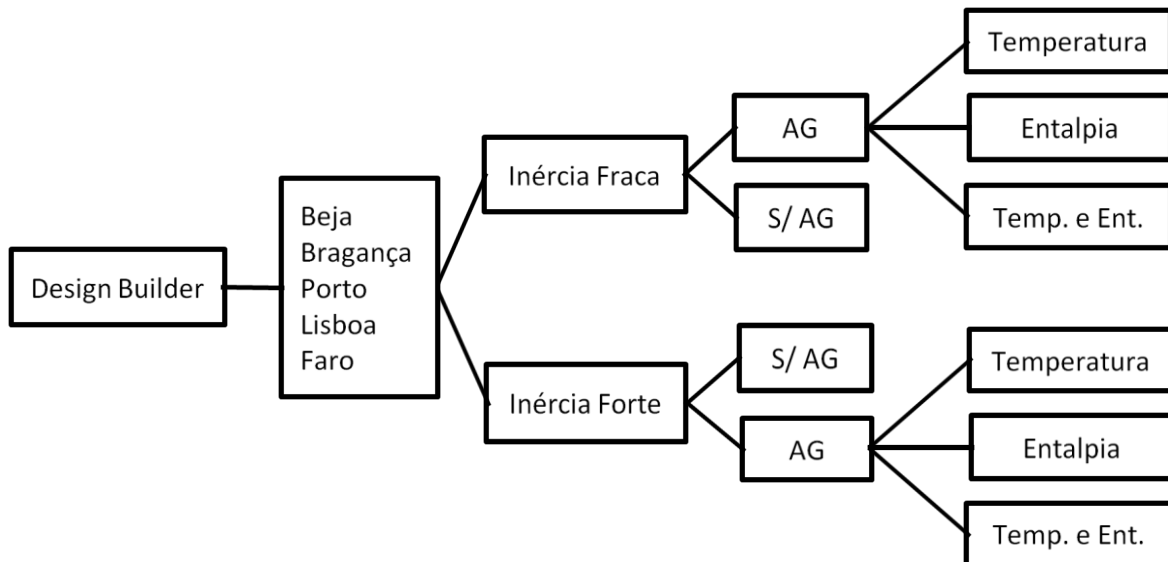


Figura 26 - Esquema da metodologia usada para as simulações no DesignBuilder. Para a simulação do sistema de ventilação noturna o esquema será semelhante, retirando apenas o tipo de sensor utilizado.

Estes serão então os *inputs* mais significativos e serão definidos em maior detalhe no capítulo 3. Depois das simulações estarem feitas, comparar-se-á o valor de *Total Cooling* ou arrefecimento total, escolhido entre os vários outputs como o que melhor representa a o impacto do arrefecimento gratuito num edifício.

Com o arrefecimento total, pode-se determinar a viabilidade ou potencialidade do arrefecimento gratuito comparando os vários tipos de edifício entre si, analisando também qual a técnica mais adequada a cada determinado perfil de utilização, sistema de controlo, em que inércia e em que localidade.

De notar que antes de seguirmos estes passos, o edifício já estará definido, estando parametrizado de acordo com as especificações de uma sala de aula, cinema ou escritório.

2.6 Resumo

Começando por definir matematicamente um sistema de arrefecimento gratuito e em que temperaturas este funcionará, terminou-se o capítulo definindo o modelo de análise do ponto de vista da simulação propriamente dita. Passa-se agora a definir os *inputs* que para além dos explicados anteriormente serão os mais importantes, os definidos na metodologia de análise na figura 26.

3. Quantificação do potencial associado

3.4.6 Sumário

No terceiro capítulo analisar-se-á as variáveis mais importantes no estudo do desempenho do aquecimento gratuito, estando entre elas a inércia e o clima, explicando o porquê da sua importância. Faz-se também um cálculo simplificado das necessidades de arrefecimento de cada tipo de edifício, finalizando o capítulo com uma análise paramétrica da inércia e das cargas internas.

3.2 Variáveis e indicadores de desempenho relevantes

3.2.1 Variáveis de entrada

As variáveis de entrada mais importantes, de acordo com a figura 26, são o tipo de inércia do edifício e o clima, ou seja, que tipo de materiais e a sua espessura iremos usar na construção do edifício e qual será o clima, ou local, onde este está inserido.

- **Clima**

É de suma importância definir o clima onde o edifício se insere, é importante na medida em que as variáveis climatéricas influenciam a maior ou menor necessidade de um sistema de arrefecimento gratuito, ou mesmo do próprio sistema AVAC. Aliás, qualquer técnica de climatização nasce da necessidade do Homem de controlar o “clima” na sua própria habitação tendo como fator principal a temperatura. Para além disso, o clima pode definir todo o edifício, desde a forma como ele está construído até aos materiais usados na sua construção, finalmente é um fator preponderante no conforto térmico.

Neste caso os climas, mais propriamente os locais escolhidos para as simulações foram cinco: Faro, Beja, Lisboa, Porto e Bragança. Foram escolhidos pelas suas características distintas, tanto por serem de latitudes bastante diferentes, Faro e Beja a sul, Lisboa como região central e Porto e Bragança a norte, como por terem localidades no litoral como Porto e Lisboa e localidades do interior, como Bragança e Beja.

Os locais têm também a característica comum de serem grandes cidades, capitais de distritos. Este aspeto é importante na medida em que de uma maneira geral estas localidades podem caracterizar o território português, sendo referências por onde uma grande maioria dos edifícios em Portugal pode ser analisada. De notar também que estes locais têm estações climatológicas perfeitamente identificadas.

De acordo com o RCCTE, o nosso país está dividido em três zonas climáticas de Inverno e três zonas climáticas de Verão. As zonas de Verão estão divididas em região Norte e região Sul, sendo que a região Sul abrange toda a área a sul do rio Tejo. Estas zonas distinguem-se pelos seguintes dados climáticos de referência: duração da estação de aquecimento, temperatura exterior e amplitude térmica média diária do mês mais quente.

Como se pode ver pela figura abaixo, em termos climáticos as regiões escolhidas são bastante distintas, analisando concretamente cada cidade escolhida, temos que o Porto pertence à zona climática de Inverno 2 e de Verão 1; Lisboa que pertence ao I1 e V2; Beja que pertence ao I1 e V3; Bragança pertence às zonas I3, V2 e finalmente temos Faro com I1 e V2 [31].

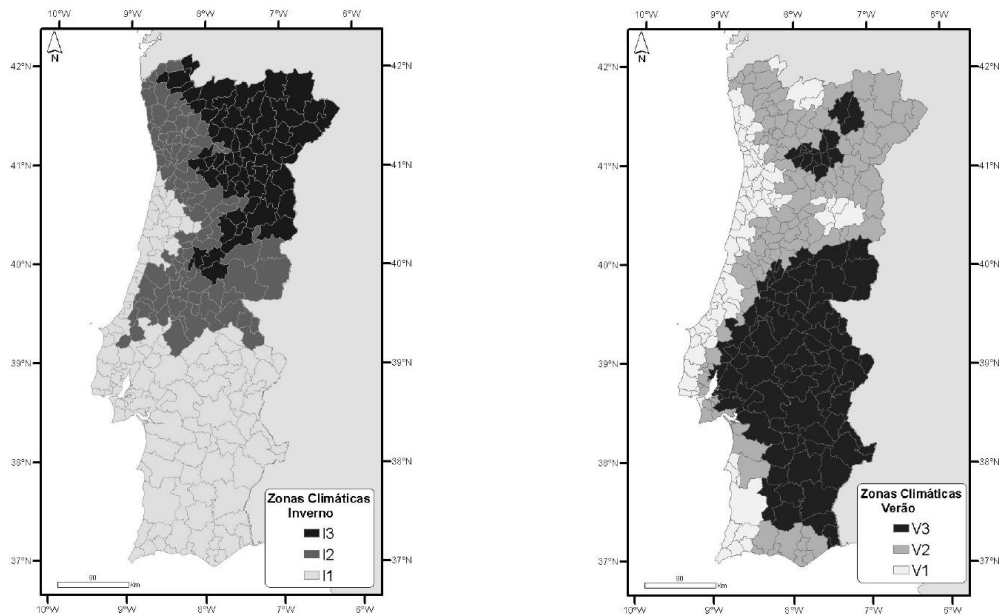


Figura 27 - Portugal com as zonas climáticas de Inverno à esquerda e de Verão à direita [31].

Essas denominações representam, especificamente, que o Porto terá no verão uma temperatura externa de projeto de 30° C; para Lisboa será 32° C; Beja 36° C; Bragança 33° C e Faro terá 32° C [31]. Distinguem-se as localidades pelas temperaturas de verão, pois coincide com a estação de arrefecimento, a mais importante para o arrefecimento gratuito.

Entender os fatores climáticos locais (orientação solar, humidade do ar, ventos predominantes de cada local) é vital para observar o custo *versus* os benefícios proporcionados pela utilização de estratégias que visam melhorar o conforto térmico do edifício. Os fatores dinâmicos do clima afetam o desempenho térmico do edifício, os ganhos e perdas de calor e dada a sua natureza dinâmica, a utilização de um *software* como o *DesignBuilder* torna-se numa ferramenta essencial neste estudo.

• Inércia

Outra variável introduzida é o tipo de inércia térmica. A inércia térmica de um edifício é a sua capacidade de contrariar as variações de temperatura no seu interior, ou seja, de reduzir a transferência ou transmissão de calor. Isto acontece devido à sua capacidade de acumular calor nos elementos construtivos. A velocidade de absorção e a quantidade de calor absorvida determina a inércia térmica dum edifício. A inércia térmica influi sobre o comportamento do edifício tanto de Inverno ao determinar a capacidade de utilização dos ganhos solares, como de Verão ao influenciar a capacidade do edifício absorver os picos de temperatura [32].

Quanto maior for a inércia mais facilmente os sistemas térmicos absorvem as solicitações sem alterarem, radicalmente, o seu estado termodinâmico. Desta forma, um edifício de grande inércia térmica tem tendência a armazenar a energia recolhida por períodos mais longos e a amenizar, assim, os efeitos das variações climáticas [33].

A utilização de um nível de inércia elevado nos edifícios pode assim contribuir para:

- Armazenar os ganhos solares de inverno e restituí-los ao interior dos recintos quando estes forem necessários, aumentando assim o seu fator de utilização
- Prevenir contra os fenómenos de sobreaquecimento característicos das estações intermédias. Estes devem-se a um aumento acentuado da temperatura exterior durante o dia e aos fortes ganhos solares devidos, sobretudo, à incidência de radiação solar direta sobre os envidraçados
- Em países de clima ameno (ex.: países do Sul da Europa), a utilização de materiais de elevada inércia térmica, com ou sem isolamento exterior, oferece, também, uma proteção eficaz contra os picos diurnos de temperatura verificados no Verão [33].

Existem três tipos de inércia térmica, essa diferenciação do cálculo da massa superficial útil por m² de área de pavimento cuja definição, cálculo e terminologia empregue vêm descritos no n.º 3 do anexo VI do RCCTE, sendo que para efeitos do regulamento foram definidas três classes de inércia térmica: forte, média e fraca [34].

Tabela 4 - Diferentes classes de inércia tendo em conta as suas grandezas.

Classe de Inércia	It [kg/m ²]
Fraca	It < 150
Média	150 ≤ It ≤ 400
Forte	It > 400

É importante notar que não foi usada na análise inércia térmica média, isto porque embora o conceito de inércia térmica forte ou fraca seja facilmente distinguível entre si, a inércia térmica média pode ser mais difícil de separar das outras duas categorias. Isto porque, como se pode ver pela tabela 4, a inércia média insere-se num intervalo onde, se estiver mais próxima de 150 kg/m², será uma inércia térmica mais “fraca”, enquanto que se estiver mais próxima de 400 kg/m², será mais “forte”. Assim sendo, optou-se por descartar por completo esse tipo de inércia.

3.2.2 Necessidades de arrefecimento

De acordo com o RCCTE as necessidades de arrefecimento são a energia útil que é necessária retirar-lhe para manter permanentemente no seu interior a temperatura de referência definida no artigo nº14 do RCCTE durante toda a estação convencional de arrefecimento, isto é, nos meses de Junho a Setembro, inclusive. Este valor não representa necessariamente o consumo real dessa zona do edifício já que, em geral, os seus ocupantes não impõem permanentemente situações exatamente iguais às de referência, podendo mesmo ocorrer diferenças substanciais por excesso ou por defeito entre as condições reais de funcionamento e as admitidas ou convencionadas como de referência [31].

O cálculo preciso dessas necessidades só é possível através de *softwares* de simulação dinâmica como o *DesignBuilder*, no entanto, o cálculo das necessidades de arrefecimento, embora não sejam extremamente precisas, servem para dar uma ideia de que tipo de edifício o arrefecimento será mais necessário.

Seguindo a metodologia para o cálculo das necessidades de arrefecimento, começa-se pela sua fórmula:

$$N_{vc} = Q_g \cdot (1 - \eta) / A_p \quad (3.1)$$

Sendo o Q_g os ganhos totais brutos do edifício ou fração autónoma, η o fator de utilização dos ganhos e A_p a área útil do pavimento.

Tanto os ganhos totais como a área útil podem-se retirar do *DesignBuilder*. Sabendo que os ganhos totais serão a soma entre os ganhos solares, os ganhos provenientes da ocupação e o calor dissipado pelos equipamentos e iluminação teremos a seguinte tabela:

Tabela 5 - Ganhos internos simulados pelo *DesignBuilder*, todos eles na localidade Porto. Valores em kWh.

Tipo de edifício	Iluminação	Equipamento	Ocupação	Solar	Ganho total
Escritório	3095,28	5000,85	1619,88	7663,36	17379,37
Sala de Aula	2447,76	1019,90	1695,1	9304,18	14466,94
Cinema	2965,5	494,25	10594,15	0	14053,9

Determinado o ganho, resta apenas o fator de utilização dos ganhos por determinar, que se pode calcular com fórmulas no método de cálculo das necessidades de aquecimento:

$$\left\{ \begin{array}{l} \eta = \frac{1 - \gamma^a}{1 - \gamma^{1-a}} \text{ se } \gamma \neq 1 \\ \eta = \frac{a}{a + 1} \text{ se } \gamma = 1 \end{array} \right. \quad (3.2)$$

Onde para determinar o γ temos:

$$\gamma = \frac{\text{Ganhos térmicos brutos}}{\text{Nec.brutas de aquec.}} = \frac{Q_g}{Q_t + Q_v} \quad (3.3)$$

Sendo o Q_t as perdas de calor pela envolvente e o Q_v as perdas de calor resultantes da renovação de ar.

Já o a estará dependente da inércia do edifício, tendo o valor de 1.8 para inércia fraca; 2.6 para inércia média e 4.2 para inércia forte. Para facilitar o cálculo, assume-se que os ganhos serão iguais às necessidades de aquecimento, resultando assim um γ igual a um e um fator de utilização de ganhos igual a:

$$\eta = \frac{1,8}{1,8 + 1} = 0,64; \text{ para inércia fraca}$$

$$\eta = \frac{4,2}{4,2 + 1} = 0,81; \text{ para inércia forte}$$

Assim sendo, fica-se com a seguinte tabela de necessidades de arrefecimento separadas pelo tipo de edifício.

Tabela 6 - Diferentes necessidades de arrefecimento para os diferentes edifícios com inércia fraca.

Tipo de edifício	Nvc [kWh/m ² .ano]
Escritório	62,57
Sala de Aula	52,08
Cinema	50,59

Tabela 7 - Diferentes necessidades de arrefecimento e ganhos totais para os diferentes edifícios com inércia forte.

Tipo de edifício	Nvc [kWh/m ² .ano]
Escritório	33,02
Sala de Aula	27,49
Cinema	26,7

De acordo com as tabelas acima, os edifícios com inércia fraca terão uma maior necessidade de arrefecimento, sendo que desses edifícios o escritório será o que despenderá uma maior energia para o arrefecimento.

3.3 Análise paramétrica

3.3.1 Cálculo da inércia

O tipo de materiais usados na construção é um fator essencial no ambiente térmico do edifício, pois os diferentes tipos de materiais passíveis de serem usados diferem pelas suas características térmicas como condutividade, emissividade ou refletividade ou mesmo capacidade de isolamento. Para cada tipo de ambiente externo onde o edifício se insere, estes materiais devem ser escolhidos de forma a aumentar o conforto de quem ocupa o espaço.

No entanto, nesta tese, insere-se o mesmo edifício em vários tipos de clima, não sendo por isso as condições externas que definem os materiais usados, mas sim a necessidade de distinguir os edifícios por tipo, neste caso, por tipo de inércia térmica, forte e fraca. Para isso teve de se definir os diferentes materiais usados nas paredes, teto e no chão. Começamos então pelos materiais usados nas paredes, neste caso para inércia forte, do exterior para o interior:

- Isolamento EPS, poliestireno expandido, com 40 mm de espessura
- Tijolo furado com 220 mm de espessura
- Argamassa com 20 mm de espessura

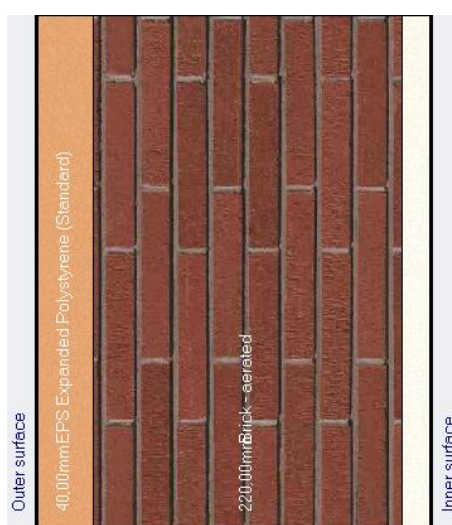


Figura 28 - Materiais usados na parede como visto no *DesignBuilder*: isolamento na parte externa, depois tijolo e reboco na parte mais interior.

Em relação à cobertura, continuando com o edifício com inércia forte, foram usados os seguintes materiais de construção, do exterior para o interior do edifício:

- Gravilha com 10 mm de espessura
- Isolamento EPS com 40mm de espessura
- Betão armado com 400 mm de espessura
- Reboco com 20 mm de espessura

De notar que entre o betão armado e o reboco que cobre a superfície interior existe uma “caixa-de-ar” com 300 mm, como visto na figura seguinte.



Figura 29 - Materiais usados na cobertura do edifício, como visto no *DesignBuilder*. De fora para dentro: gravilha, isolamento EPS, betão armado e reboco na parte mais interior.

Finalmente, quanto ao piso, o único material utilizado para o edifício com inércia forte foi betão armado, com 200 mm de espessura.



Figura 30 - Pavimento de betão como visto no *DesignBuilder*.

Para descer a inércia do edifício o suficiente para esta tornar-se fraca, foi necessário essencialmente remover material. Na parede externa removeu-se a camada de argamassa e para a cobertura removeu-se o reboco, deixando o betão como camada superficial.

Finalmente, para o piso, adicionou-se uma camada de um material isolante, mais uma vez para descer a inércia do edifício.

Tendo definido todos os materiais usados na simulação, segue-se o cálculo da inércia em si, mas como é que se determina o seu valor?

Para se efetuar o cálculo da inércia térmica de um edifício, o RCCTE sugere o seguinte procedimento:

- a. Calcular a massa dos elementos exteriores, em contacto com outra fracção ou espaço não-útil, sabendo que se o elemento não possuir isolamento térmico, a massa superficial útil (M_{si}) é metade da massa total do elemento (m_t); enquanto que se o elemento possuir isolamento térmico $M_{si} = m_t$, contabiliza-se a massa a partir do isolamento para o interior. Mas em nenhum dos casos a M_{si} pode ultrapassar os 150 Kg/m^2 ;
- b. Calcular a massa dos elementos em contacto com o solo, sabendo que se o elemento não possuir isolamento térmico a massa superficial útil (M_{si}) é 150 Kg/m^2 , enquanto que se o elemento possuir isolamento térmico $M_{si} = m_t$, contabiliza-se a massa a partir do isolamento para o interior. Mas em nenhum dos casos a M_{si} pode ultrapassar os 150 Kg/m^2 ;
- c. Calcular a massa dos elementos interiores, sabendo que $M_{si} = m_t$, mas a M_{si} não pode ultrapassar os 300 Kg/m^2 ;
- d. No caso dos elementos contemplados nos pontos a e b possuírem revestimentos superficiais com uma resistência térmica compreendida entre $0.14 < R \leq 0.5 \text{ m}^2 \cdot \text{°C/W}$, é necessário multiplicar a M_{si} por um factor correctivo $r = 0.5$;
- e. No caso dos elementos contemplados no ponto c possuírem revestimentos superficiais com uma resistência térmica superior a 0.14 , é necessário multiplicar a M_{si} por um fator correctivo $r = 0.75$, quando o revestimento apenas se apresenta numa face do elemento, ou $r = 0.5$ quando o revestimento se apresente nas duas faces do elemento;
- f. Por último é necessário aplicar a equação 20, sabendo que S_i é a área superficial interior do elemento.

O cálculo da inércia térmica está diretamente ligado à massa superficial de cada elemento da envolvente e depende da localização do isolamento, este quando colocado no interior, o valor de M_{si} tende para zero. Tendo este facto em conta, começemos por calcular a inércia do edifício, para isso temos de saber os valores da densidade (ρ) e condutividade (κ) [31].

Tabela 8 -Valores de densidade e condutividade para todos os materiais usados nas diferentes simulações do edifício.

Materiais usados	$\rho[\text{kg/m}^3]$	$\kappa[\text{W/m.K}]$
EPS Poliestireno expandido	15	0.040
Tijolo furado	1000	0.3
Reboco	600	0.16
Argamassa	1120	0.51
Betão armado	2400	2.2

Sabendo estes valores, define-se também as fórmulas que teremos de usar, começando na fórmula da inércia térmica:

$$I_t = \frac{\sum M s_i \cdot r \cdot S_i}{A_p} \quad (3.4)$$

Nesta equação, apenas A_p ficou já definido, consistindo na área do piso interior da zona estudada, que neste caso será 100 m², ou seja, todo o edifício.

$$M_s = \sum \rho \cdot e \quad (3.5)$$

Nesta segunda equação teremos a massa superficial útil, que consiste no somatório das densidades dos materiais existentes depois de um isolamento, multiplicadas pelas suas espessuras. No caso das paredes, por exemplo, como o isolamento é o elemento mais externo, todos os materiais irão contar nesta fórmula, nomeadamente o tijolo furado e o reboco.

$$R = \frac{e}{k} \quad (3.6)$$

Por fim temos o cálculo da resistência térmica, calculado dividindo a espessura do material superficial pela sua condutividade. Retirando através do valor de R o fator de correção r , de acordo com a seguinte tabela:

Tabela 9 - Valores do fator de correção, definidos a partir do valor calculado através da equação 22.

Valores de resistência térmica r	
$R \leq 0.14$	1
$0.14 < R \leq 0.3$	0.5
$R > 0.3$	0

• Inércia Forte

Tendo todas as equações e valores necessários, passamos então ao cálculo em si, começando pelo edifício desenhado para ter a maior inércia térmica:

M_s (parede externa) = $1000 \times 0.22 + 1120 \times 0.02 = 242.4$, o que significa que o valor será 150 kg/m², tendo em conta o ponto *a* acima descrito.

M_s (teto) = $2400 \times 0.4 + 600 \times 0.02 = 972$, ou seja, o resultado será 150 kg/m².

R (parede externa) = $\frac{0.02}{0.5} = 0.04$, o valor de r será 1 de acordo com a tabela 9.

R (piso) = $\frac{0.22}{2.2} = 0.1$, valor de $r=1$

R (cobertura) = $\frac{0.02}{0.16} = 0.12$, valor de $r=1$

Nesta fase, estaremos prontos para determinar a inércia. Para simplificar, passa-se a definir os valores calculados na seguinte tabela:

Tabela 10 - os valores necessários ao cálculo da inércia (Inércia forte).

	Msi [kg/m ²]	Si [m ²]	Fator correção (r)	Msi.r.Si
Parede externa	150	140	1	21000
Piso	150	100	1	15000
Teto	150	100	1	15000

$$\sum Msi.r.Si = 51000 \text{ kg}$$

$It = \frac{51000}{100} = 510 \text{ kg/m}^2$, sendo o valor superior a 400, de acordo com a tabela 4, o edifício terá uma Inércia Forte.

• Inércia Fraca

Já para o edifício com inércia fraca, o método será idêntico, tendo alterações nas paredes e no piso.

$$Ms(\text{parede externa}) = 1000 \times 0.22 = 220, \text{ tendo assim o valor } 150 \text{ kg/m}^2$$

$$Ms(\text{teto}) = 2400 \times 0.4 = 960, \text{ ou seja, o resultado será } 150 \text{ kg/m}^2.$$

$Ms(\text{piso}) = 530 \times 0.015 = 7.95$, ao contrário do ponto *b*, visto que o piso tem isolamento, a massa superficial útil não será automaticamente 150 kg/m^2 , sendo antes o valor obtido no cálculo.

$$R(\text{parede externa}) = \frac{0.22}{0.3} = 0.73, \text{ o valor de r será 0 de acordo com a tabela 9.}$$

$$R(\text{piso}) = \frac{0.22}{2.2} = 0.1, \text{ valor de r}=1$$

$$R(\text{cobertura}) = \frac{0.4}{2.2} = 0.88, \text{ valor de r}=0$$

Passamos então determinar os restantes valores na seguinte tabela.

Tabela 11 - Todos os valores necessários ao cálculo da inércia (Inércia fraca).

	Msi [kg/m ²]	Si [m ²]	Fator correção (r)	Msi.r.Si
Parede externa	150	140	0	0
Piso	7.95	100	1	795
Teto	150	100	0	0

$$\sum Msi.r.Si = 795 \text{ kg}$$

$It = \frac{795}{100} \cong 7.95 \text{ kg/m}^2$, sendo o valor inferior a 150, de acordo com a tabela 4, o edifício terá uma Inércia Fraca.

É importante notar que nesta tese o que irá distinguir os perfis de utilização, isto é, o cinema, sala de aula e escritório será a ocupação, tipo de equipamento utilizado ou o horário de funcionamento, sendo que a inércia será a mesma para os três, seja esta forte ou fraca.

Sabe-se no entanto que o caso do cinema é totalmente diferente dos restantes, com materiais de construção distintos, com as superfícies interiores alcatifadas para otimizar as qualidades acústicas do espaço. Essas mesmas características tornam a inércia térmica de um cinema diferente dos restantes tipos de edifícios estudados, mas esse é um erro assumido num estudo onde é mais importante mostrar o impacto do arrefecimento gratuito num edifício com ocupação noturna do que especificamente num cinema.

3.3.2 Carga interna

A carga interna total de um edifício provém de três fontes principais: ocupação, equipamentos e iluminação. De acordo com o *DesignBuilder*, essas três fontes estão descritas do seguinte modo:

• Ocupação

O modelo de ocupação define o número de pessoas no espaço e o tempo de ocupação. Esses dados são usados nas simulações juntamente com o metabolismo dos ocupantes.

O metabolismo determina a quantidade de ganho térmico por pessoa numa zona. A taxa de metabolismo tem como unidade Watt por pessoa e representa o total de ganho térmico por pessoa, incluindo calor convectivo, radiante e latente. Um algoritmo interno é usado para determinar que fração desse total é sensível e que fração é latente, sendo depois a porção sensível dividida pelas porções radiante e convectiva.

Os dados do *DesignBuilder* provém da ASHRAE (Capítulo 8, Tabela 5) sendo para homens adultos com uma superfície de pele com uma área de 1.8 m². Para mulheres multiplica-se o valor dos homens por 0.85 e para crianças por 0.75.

O tipo de vestuário também influencia este ganho pois reduz a perda de calor do corpo, funcionando como isolamento. *Clo* é a unidade normalmente usada para medir o isolamento proporcionado pelo vestuário, podendo o isolamento de cada peça de vestuário ser encontrado no ISO 7730.

Este tipo de dados é usada no *output* conforto [29].

• Iluminação

A iluminação tem como unidade o W/m², sendo o valor total multiplicado por uma fração do horário escolhido para determinar a potência da iluminação num determinado período de tempo.

A iluminação contribui como fonte de calor para a zona e para o ar de retorno. No *EnergyPlus* este ganho é dividido em quatro frações diferentes. Três destas são dadas pelos *inputs* fração do ar de retorno (*Return Air Fraction*), fração radiante (*Fraction Radiant*) e fração visível (*Fraction Visible*). Uma quarta, definida como a fração do calor da iluminação transmitida para a zona convecção é calculada da seguinte forma [29]:

$$\text{Fração de convecção} = 1.0 - (\text{Ar de retorno} + \text{Radiante} + \text{Visível}) \quad (3.7)$$

Estas frações dependem do tipo de lâmpada e luminária e sendo a luminária suspensa, como visto no capítulo 2.4.5, os valores de cada fração serão os seguintes:

Tabela 12 - Diferentes frações usadas para o cálculo do ganho de iluminação [35].

	Luminária suspensa
Fração de ar de retorno	0
Fração radiante	0.42
Fração visível	0.18

Assim sendo, tendo uma iluminação suspensa, a fração de convecção terá o valor de 0.4. De notar que estes valores assumem que nenhum calor proveniente da iluminação vai para zonas adjacentes [29].

• Equipamento

O ganho térmico devido ao equipamento será dividido por área de piso. O combustível é assumido como sendo eletricidade e pressupõe-se que todos os ganhos são emitidos para o espaço.

No *DesignBuilder* é apenas considerado a fração radiante do calor transmitido para o espaço pelo equipamento, essa fração será representada por um número decimal entre zero e um. A fração radiante será multiplicada pela energia total consumida pelo equipamento. Se o valor dessa fração for zero significará que o ganho de calor é unicamente convectiva, sendo todo o calor transferido para o ar da zona. Se o valor for um, significará que o ganho é totalmente radiativo, sendo o calor distribuído para as superfícies internas, um valor típico será algo entre 0.1 e 0.4, o valor usado foi 0.2 [29].

3.4 Resumo

Neste capítulo explicou-se a importância do clima e da inércia térmica, tendo-se feito uma análise desta última e da carga interna do edifício. Conclui-se também que a inércia forte terá maiores necessidades de arrefecimento, sendo que o escritório será dos tipos de perfil de utilização, aquele que necessitará de despende mais energia para dissipar a sua carga. No capítulo seguinte poder-se-á determinar se essa previsão estará de acordo com os resultados retirados das simulações.

4. Análise de resultados

4.1 Sumário

Neste capítulo irão ser apresentados todos os valores de arrefecimento total retirado das simulações feitas no *DesignBuilder*. Esses valores estarão separados por tipo de técnica utilizada no arrefecimento gratuito, sendo essas a ventilação noturna e o arrefecimento gratuito como o *DesignBuilder* o simula, separado por tipos de sensor utilizado no sistema.

O capítulo termina com a análise desses mesmos resultados.

4.2 Resultados por técnica de arrefecimento gratuito

4.2.1 Arrefecimento gratuito por tipo de sensor

Para determinar a eficiência ou potencialidade do arrefecimento gratuito, como referido no capítulo 2.5, retiram-se os valores de *Total Cooling* ou arrefecimento total em kWh, referentes a um ano inteiro. Esses valores são usados como base para não só determinar o impacto que o arrefecimento gratuito terá no consumo energético, nomeadamente na energia consumida para o arrefecimento, mas também para comparar as várias técnicas, inércias, perfis de ocupação ou localidades.

Em relação à técnica utilizada, começa-se pelos valores retirados das simulações referentes ao arrefecimento gratuito “padrão”, ou seja, o arrefecimento conforme o *DesignBuilder* simula diretamente, separando-o por tipo de sensor e perfil de edifício, cinema, escritório ou sala de aula. Começa-se pelos resultados para os edifícios com inércia fraca.

- Inércia fraca

Tabela 13 - Resultados para o cinema utilizando os vários sensores do sistema de arrefecimento gratuito. Inércia fraca.

Cinema	Temp. de retorno	Entalpia de retorno	Temp. e Ent. de retorno
Beja	1099,52	1103,12	1099,62
Bragança	490,06	492,52	491,33
Faro	1210,83	1213,7	1211,03
Lisboa	669,91	671,13	670,22
Porto	51,33	51,72	51,4

A tabela acima está separada por localidades e diferentes tipos de sensores utilizados pelo sistema de arrefecimento gratuito, a função desses sensores encontram-se explicada no capítulo 2.4.6.

Tabela 14 - Resultados para o escritório utilizando os vários sensores do sistema de arrefecimento gratuito. Inércia fraca.

Escritório	Temp. de retorno	Entalpia de retorno	Temp. e Ent. de retorno
Beja	2525,61	2539,99	2538,18
Bragança	1542,57	1552,92	1554,01
Faro	4030,93	4110,67	4111,75
Lisboa	3022,58	3034,93	3034,51
Porto	820,72	830,74	830,33

Tabela 15 - Resultados para a sala de aula utilizando os vários sensores do sistema de arrefecimento gratuito. Inércia fraca.

Sala de Aula	Temp. de retorno	Entalpia de retorno	Temp. e Ent. de retorno
Beja	331,87	332,24	331,91
Bragança	158,02	158,43	158,04
Faro	162,97	164,63	163,71
Lisboa	242,01	242,38	242,13
Porto	12,83	12,94	13,5

- **Inércia forte**

Passa-se a apresentar os valores para os mesmos sensores e perfis de edifício, desta feita, com inércia forte.

Tabela 16 - Resultados para o cinema utilizando os vários sensores do sistema de arrefecimento gratuito. Inércia forte.

Cinema	Temp. de retorno	Entalpia de retorno	Temp. e Ent. de retorno
Beja	337,93	338,68	337,94
Bragança	144,09	144,5	144,12
Faro	271,8	272,74	271,81
Lisboa	61,23	61,33	61,24
Porto	7,28	7,33	7,29

Tabela 17 - Resultados para o escritório utilizando os vários sensores do sistema de arrefecimento gratuito. Inércia forte.

Escritório	Temp. de retorno	Entalpia de retorno	Temp. e Ent. de retorno
Beja	1101,05	1103,47	1102,45
Bragança	684,66	686,38	685,86
Faro	1377,75	1386,7	1383,05
Lisboa	1219,26	1221,52	1220,39
Porto	290,5	292,73	291,93

Tabela 18 - Resultados para a sala de aula utilizando os vários sensores do sistema de arrefecimento gratuito. Inércia forte.

Sala de Aula	Temp. de retorno	Entalpia de retorno	Temp. e Ent. de retorno
Beja	290,68	291,04	290,7
Bragança	133,29	133,54	133,31
Faro	132,08	133,3	132,09
Lisboa	200,54	200,74	200,58
Porto	9,63	9,7	9,63

4.2.2 Arrefecimento gratuito por ventilação noturna

A ventilação noturna, como referido no capítulo 1.4.2.2, baseia-se essencialmente numa ventilação durante a noite, baixando a temperatura do edifício que de si já estará mais fresco do que durante o dia, usando depois a própria inércia do edifício para o manter fresco durante o dia antes de se usar finalmente a ventilação mecânica para manter a temperatura de conforto. Esta técnica deve-se usar de preferência em edifícios de serviço pois o período noturno coincide com o período sem ocupação, esse facto significa que esta técnica não será possível para o caso do cinema, pois o edifício mantém-se ocupado durante a noite.

Tabela 19 - Resultados para a sala de aula e escritório utilizando ventilação noturna. Inércia fraca.

	Escritório	Sala de aula
Beja	3160,52	748,97
Bragança	1900,13	358,04
Faro	2736,04	336,75
Lisboa	3261,73	537,51
Porto	550,66	40,76

Tabela 20 - Resultados para a sala de aula e escritório utilizando ventilação noturna. Inércia forte.

	Escritório	Sala de aula
Beja	1624,7	186,17
Bragança	990,06	381,5
Faro	1625,75	337,54
Lisboa	1930,27	756,32
Porto	297,4	49,68

Finalmente apresentam-se os valores do arrefecimento total no caso de não existir um sistema que assegure o arrefecimento gratuito. Estes valores servirão naturalmente para determinar em que circunstância a utilização desse sistema terá um maior impacto no consumo energético.

Tabela 21 - Resultados para os diferentes tipos de edifício sem a utilização de um sistema de arrefecimento gratuito. Inércia fraca.

	Cinema	Escritório	Sala de aula
Beja	1385,44	3163,89	889,65
Bragança	661,76	1907,11	445,77
Faro	1239,1	4240,77	449,92
Lisboa	897,11	3628,49	811,14
Porto	61,84	831,92	60,45

Tabela 22 - Resultados para os diferentes tipos de edifício sem a utilização de um sistema de arrefecimento gratuito. Inércia forte.

	Cinema	Escritório	Sala de aula
Beja	857,8	1761,18	840,42
Bragança	363,54	1057,85	415,36
Faro	426,07	1687,65	407,39
Lisboa	197,92	1966,59	749,39
Porto	23,32	322,89	53,67

4.3 Comparação de resultados

Para a comparação de resultados ser a mais intuitiva possível, irá ser feita parâmetro a parâmetro, isto é, a análise será feita tendo em conta a localidade e inércia. Estas, juntamente com as diferentes técnicas usadas serão analisadas recorrendo a gráficos para melhor compreensão.

4.3.1 Localidade e perfil de utilização

Recordando o capítulo 3.2.1, temos que em média, a localidade mais quente será Beja, seguida por Bragança, Faro e Lisboa, sendo o Porto a localidade mais fresca. Isso significa, que os valores de arrefecimento total retirados do *DesignBuilder* terão em teoria essa mesma hierarquia.

Analisando, por exemplo, os valores do arrefecimento total dos edifícios com inércia fraca, sem o sistema de arrefecimento gratuito, temos o seguinte gráfico para os diferentes tipos de perfis de utilização:

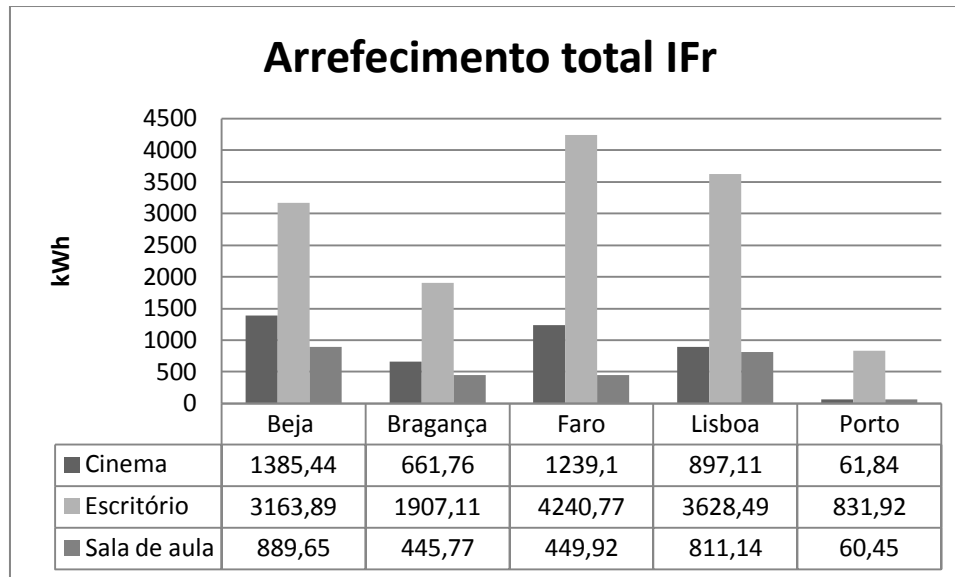


Gráfico 1 - Todos os valores de arrefecimento total para os edifícios com inércia fraca sem sistema de arrefecimento gratuito.

A partir do gráfico acima verifica-se que, apesar de ser uma componente muito importante, o clima por si só não determina o consumo de energia usada para o arrefecimento de um edifício, e por conseguinte, não pode determinar sozinha a potencialidade do arrefecimento gratuito. No caso de Beja, por exemplo, apesar de ser a localidade com o clima mais quente, esse facto não coincide com o maior arrefecimento total para o escritório.

Por outro lado, o gráfico indica qual o perfil de edifício que consome mais energia para o seu arrefecimento, sendo esse claramente o escritório, seguido de longe pelo cinema, deixando a sala de aula para último lugar.

O cinema apesar de ter uma maior densidade ocupacional (Tabela 3), não tem qualquer carga solar e por conseguinte terá a menor carga interna dos três (Tabela 5), no entanto, um cinema terá ocupação durante o ano inteiro, coisa que não acontece no caso de uma sala de aula, que das três terá o maior tempo sem ocupação devido às férias escolares, deixando o escritório que com a maior carga interna aliada a uma constante ocupação anual, será então o que consumirá mais energia.

4.3.2 Inércia

Tendo a inércia um impacto direto nas necessidades de arrefecimento que, ao contrário do clima, não requer qualquer simulação dinâmica para o prever, pode-se afirmar com um elevado grau de certeza que quanto maior for a inércia, menor será o arrefecimento, ou mesmo aquecimento total uma vez que a inércia define o grau de resistência do edifício a qualquer mudança de temperatura.

Essa mesma previsão é sublinhada pelos valores da necessidade de arrefecimento calculadas no capítulo 3.2.2.

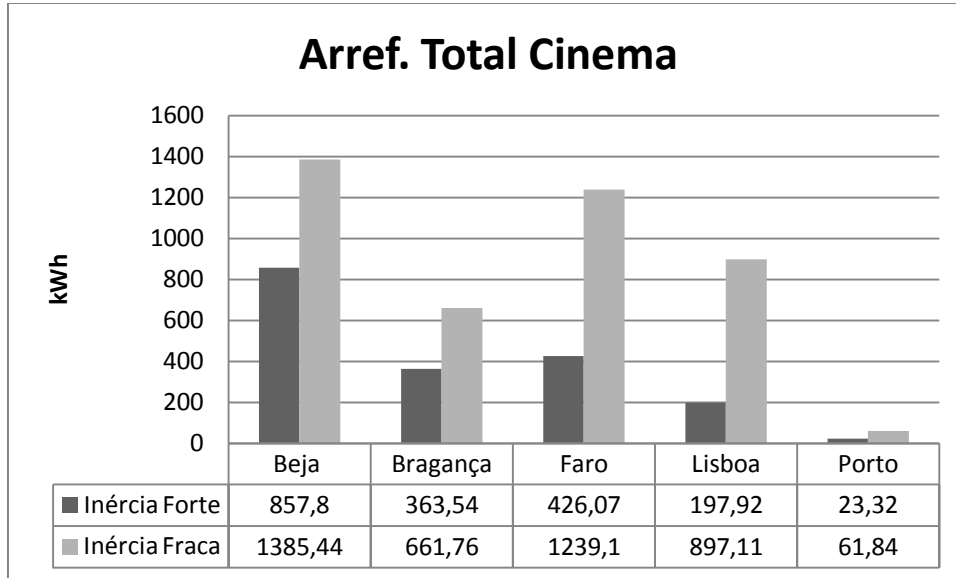


Gráfico 2 - Comparação entre os valores para o arrefecimento total no cinema para inércia forte e fraca.

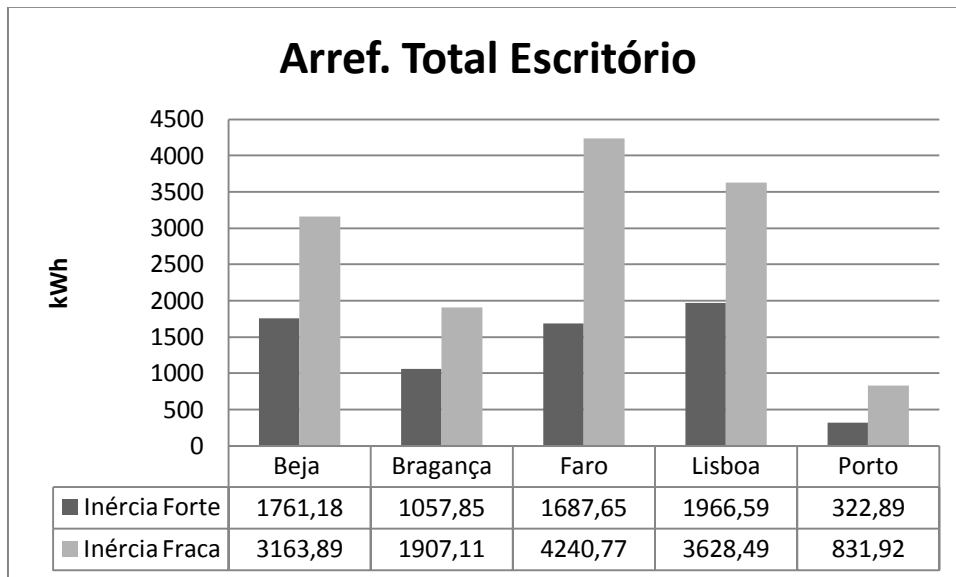


Gráfico 3 - Comparação entre os valores para o arrefecimento total no escritório para inércia forte e fraca.

Como se pode constatar pelos gráficos 2,3 e 4, embora não sejam todos os dados recolhidos, representam uma amostra fiel do que acontece em todos eles, isto é, o consumo energético necessário para o arrefecimento do edifício, seja ele qual for, ou qualquer que seja a localidade, será inversamente proporcional à inércia, isto devido à vulnerabilidade de um edifício em relação às alterações de temperatura quanto menor for a sua inércia.

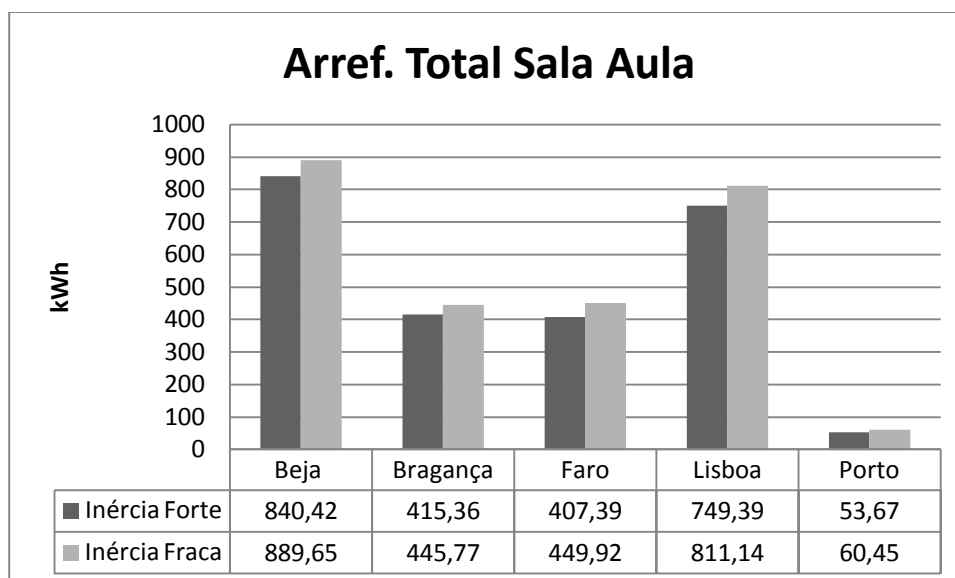


Gráfico 4 - Comparação entre os valores para o arrefecimento total na sala de aula para inércia forte e fraca.

4.3.3 Técnica de arrefecimento gratuito

Passamos então ao cerne da tese, determinar qual a técnica de arrefecimento gratuito será a mais apropriada e em que contexto. Primeiro compararam-se os diferentes tipos de sensores determinando qual destes irá poupar mais energia no arrefecimento do edifício, para finalmente comparar os resultados obtidos sem sistema de arrefecimento gratuito com os recolhidos com sensor e com os resultados da ventilação noturna.

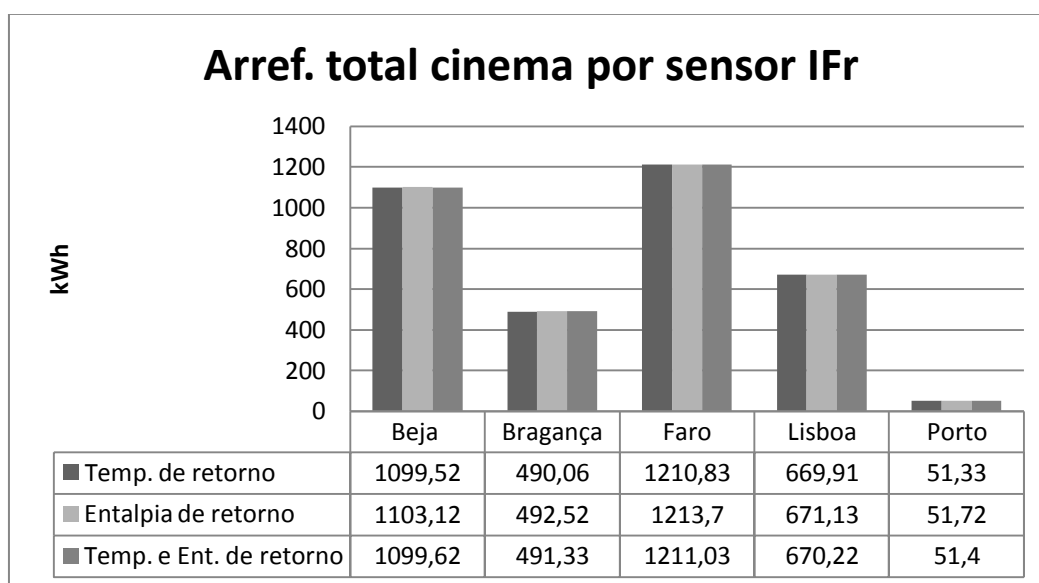


Gráfico 5 - Comparação entre os valores para o arrefecimento total, separados por tipo de sensor, no cinema para inércia fraca.

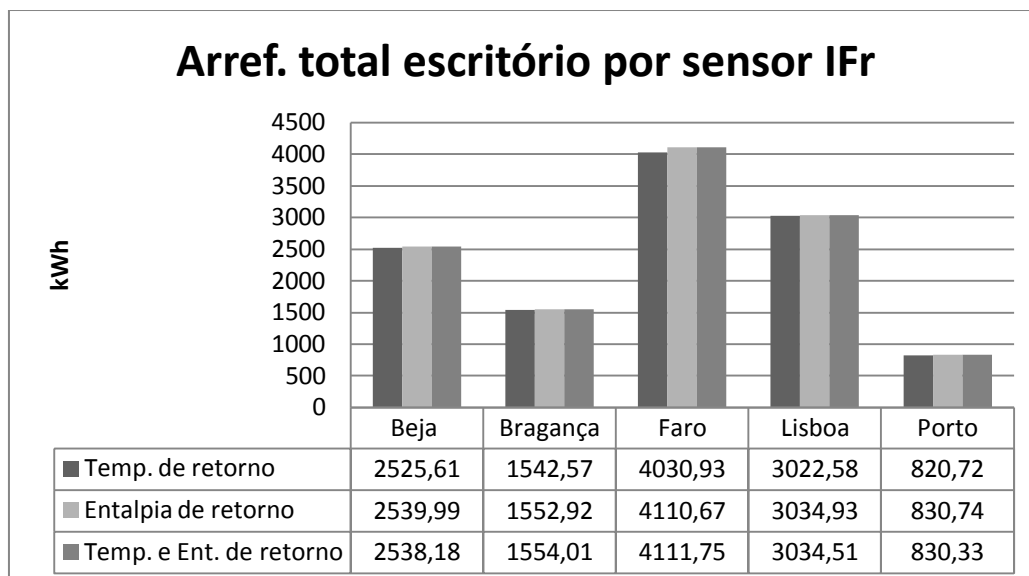


Gráfico 6 - Comparação entre os valores para o arrefecimento total, separados por tipo de sensor, no escritório para inércia fraca.

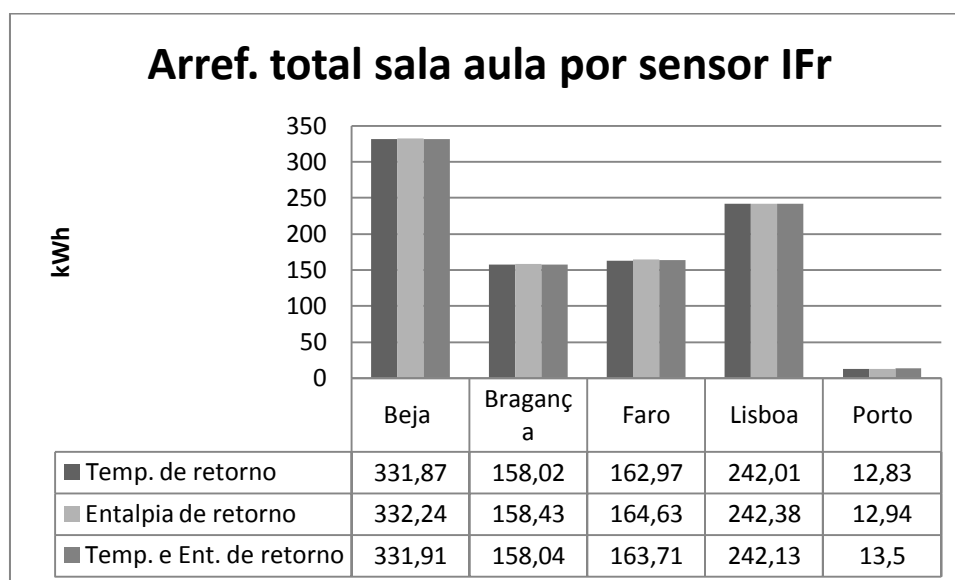


Gráfico 7 - Comparação entre os valores para o arrefecimento total, separados por tipo de sensor, na sala de aula para inércia fraca.

No perfil de escritório, verificam-se as maiores diferenças no arrefecimento total obtido utilizando diferentes sensores, sendo a maior registada de cerca de 42 kWh anuais, em Faro. Consta-se por isso que alterar o tipo de sensor não proporciona uma diferença acentuada em termos de consumo energético. Passa-se agora para os valores obtidos nas mesmas condições, mas para edifícios com inércia forte para aferir se estes valores se mantêm.

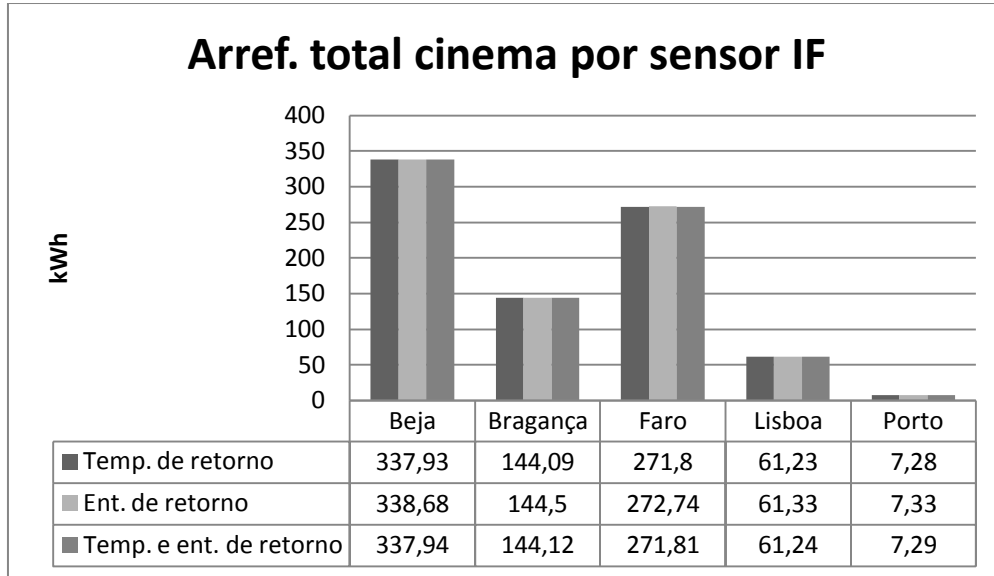


Gráfico 8 - Comparação entre os valores para o arrefecimento total, separados por tipo de sensor, no cinema para inércia forte.

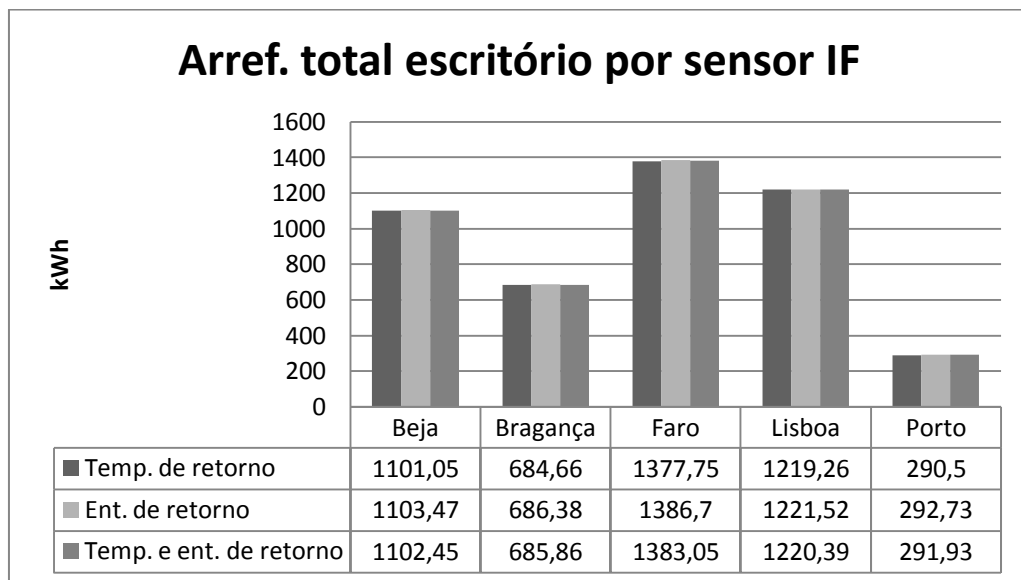


Gráfico 9 - Comparação entre os valores para o arrefecimento total, separados por tipo de sensor, no escritório para inércia forte.

Os gráficos 8,9 e 10 acentuam a tendência verificada nos gráficos referentes à inércia fraca, sendo que neste caso a maior diferença de arrefecimento total verificado aquando da mudança de sensor é de cerca de 10 kWh anuais, obtido nas mesmas condições dos gráficos anteriores. Isto significa que para inércia forte a diferença que se obtém mudando o sensor é ainda menos significativa, senão mesmo virtualmente nula.

Verifica-se também que enquanto o sensor de temperatura é aquela que produz melhores resultados, o sensor de entalpia é aquele que em comparação com os outros, consome mais energia.

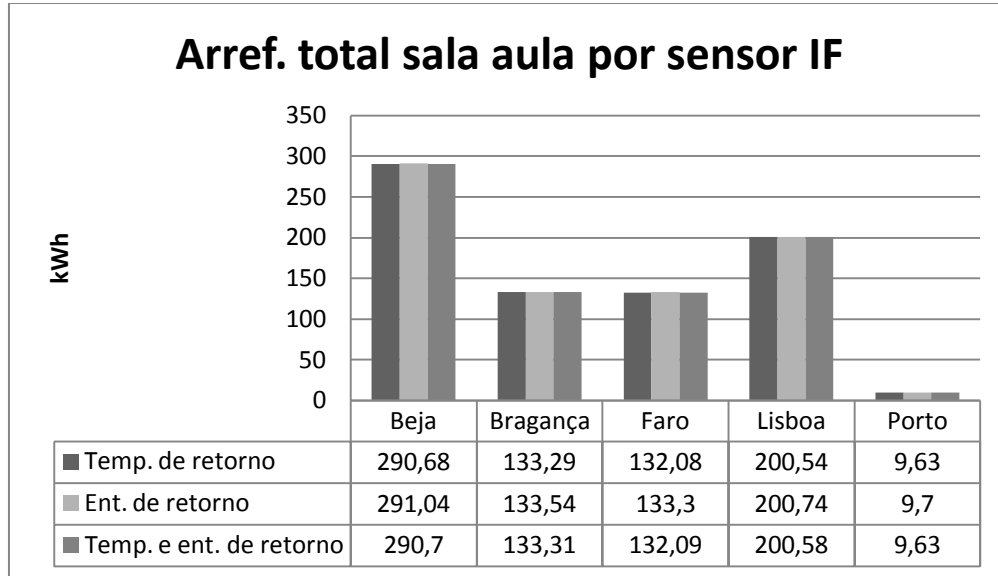


Gráfico 10 - Comparação entre os valores para o arrefecimento total, separados por tipo de sensor, na sala de aula para inércia forte.

Passa-se agora a comparar estes resultados com os recolhidos sem a utilização de um sistema de arrefecimento gratuito, para determinar o se pode poupar em termos energéticos. Com o intuito de simplificar a análise, escolhe-se de entre os resultados anteriores aqueles que consomem menos energia, isto é, os pertencentes ao sensor de temperatura.

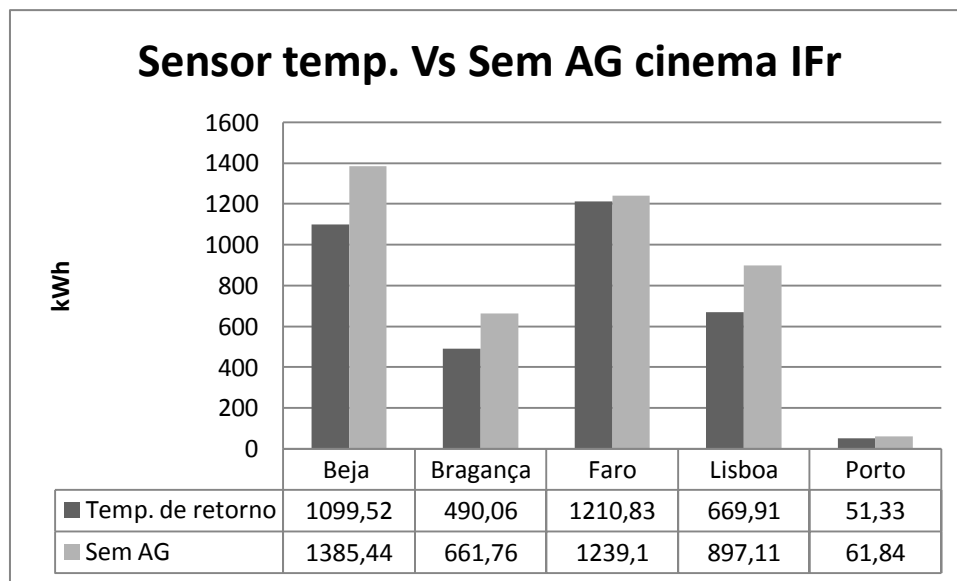


Gráfico 11 - Comparação entre valores para o arrefecimento total com e sem arrefecimento gratuito controlado por sensor. Valores para o cinema com inércia fraca.

Como seria previsível, o arrefecimento total será menor quando usado o sistema de arrefecimento gratuito, no entanto, existem diferenças consoante o perfil utilizado.

No caso do cinema, será em Beja onde se verifica uma maior poupança, com 286 kWh anuais poupados, seguido por Bragança com uma diferença de 171 kWh e Lisboa com 227 kWh.

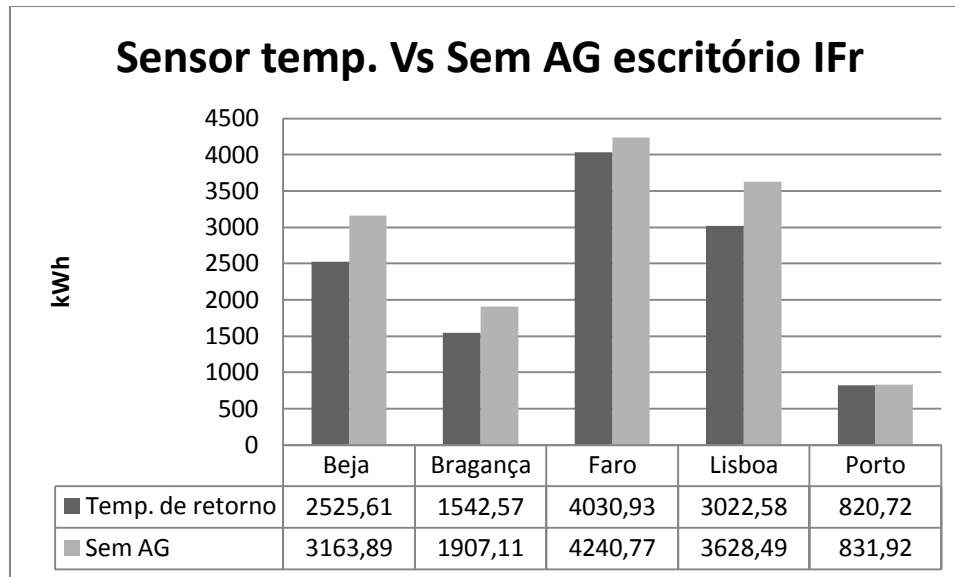


Gráfico 12 - Comparação entre valores para o arrefecimento total com e sem arrefecimento gratuito controlado por sensor. Valores para o escritório com inércia fraca.

No caso do escritório, Faro e Porto continuam a ser as localidades com menor potencialidade para o sistema de arrefecimento gratuito, obtendo uma diferença de arrefecimento total anual de 210 e 11 kWh respetivamente. Beja continua a ser o caso onde o sistema tem melhores resultados com uma diferença de 638 kWh, seguindo desta feita por Lisboa com 606 kWh e Bragança com 364 kWh.

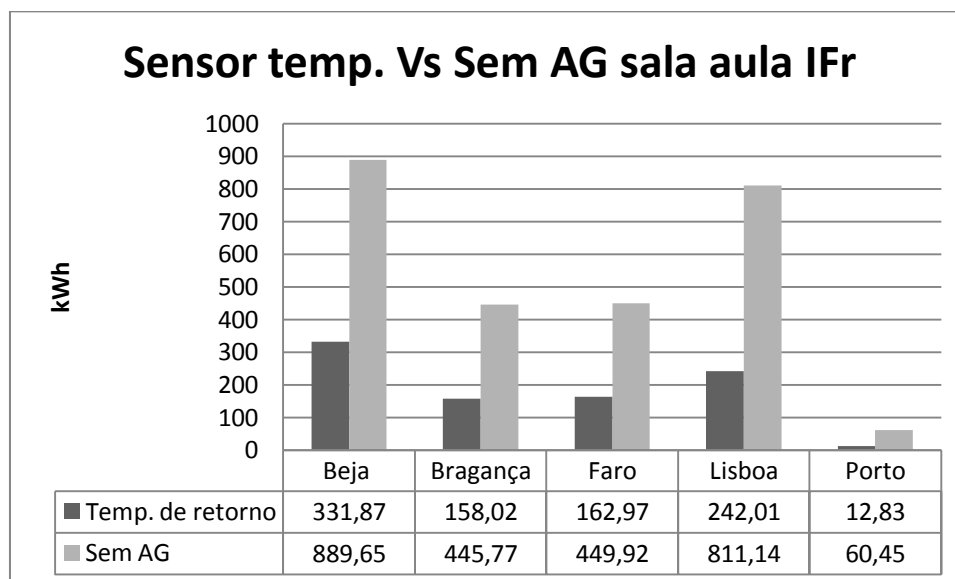


Gráfico 13 - Comparação entre valores para o arrefecimento total com e sem arrefecimento gratuito controlado por sensor. Valores para a sala de aula com inércia fraca.

Finalmente para a sala de aula, continuamos com o Porto como sendo a localidade que piores resultados oferece com apenas 48 kWh de arrefecimento total poupado, no entanto, Beja deixa de ser a melhor localidade nesse aspeto, passando a ser Lisboa com 569 kWh, seguido de muito perto por Beja com 557, deixando Bragança e Faro com praticamente os mesmos resultados, 288 e 286 kWh respetivamente.

Passamos então a fazer a mesma análise, desta feita, com os edifícios com inércia forte.

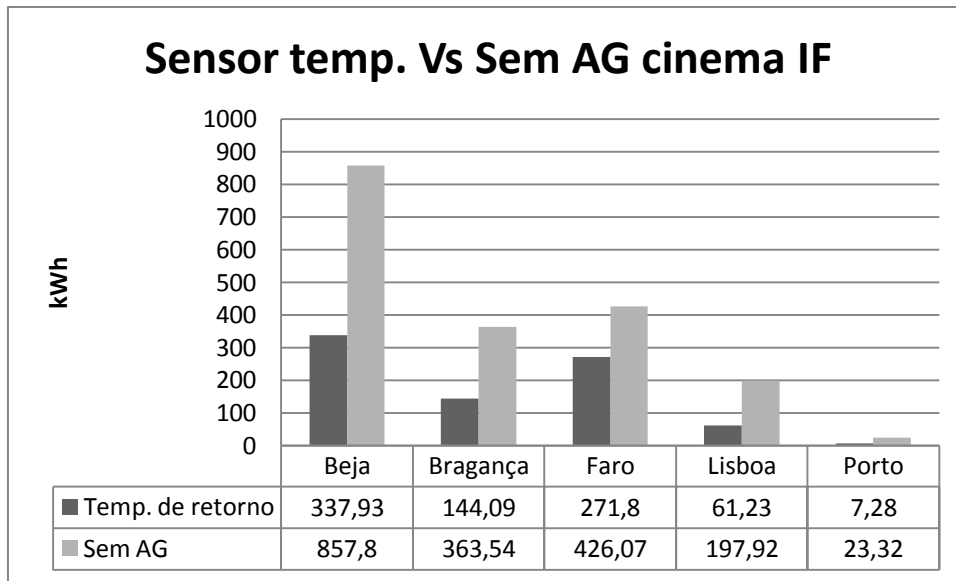


Gráfico 14 - Comparação entre valores para o arrefecimento total com e sem arrefecimento gratuito controlado por sensor. Valores para o cinema com inércia forte.

Começa-se como na inércia fraca, com o cinema, que continua com Beja como sendo a localidade onde o sistema tem uma maior impacto, com 520 kWh de diferença, seguido mais uma vez por Bragança com 219 kWh e Lisboa com 137 kWh. Desta feita, as diferenças de Faro e Porto não são tão negligenciáveis como acontece com a inércia forte, sendo mesmo Faro o terceiro caso com maior diferença de arrefecimento total com 154 kWh, restando o Porto com 16 kWh.

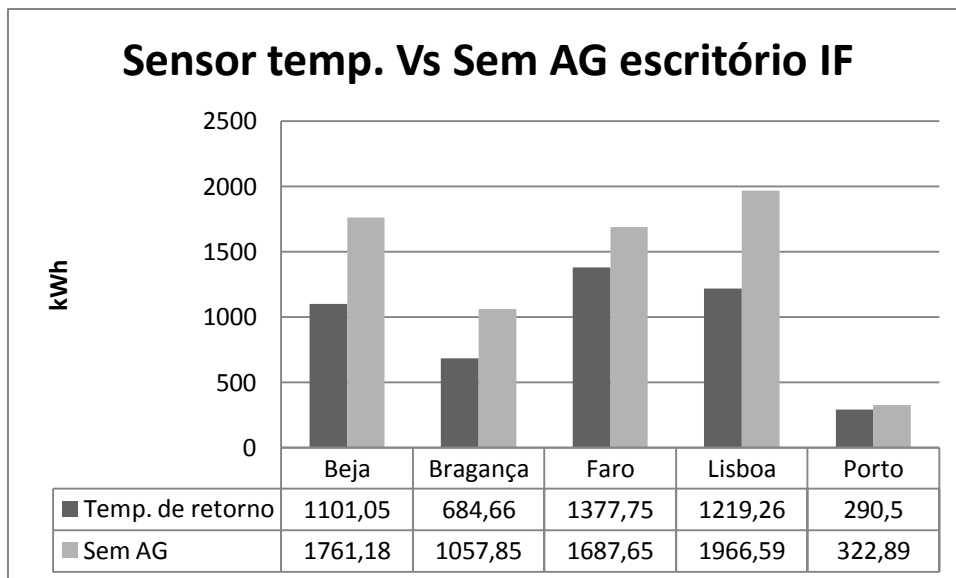


Gráfico 15 - Comparação entre valores para o arrefecimento total com e sem arrefecimento gratuito controlado por sensor. Valores para o escritório com inércia forte.

Com o escritório, como no seu caso homólogo na inércia fraca, temos Lisboa como sendo a localidade com a melhor diferença 747 kWh, seguido por Beja com 660 kWh, Bragança 373 kWh, Faro 310 kWh e o Porto, como sempre com a pior diferença, de 33 kWh.

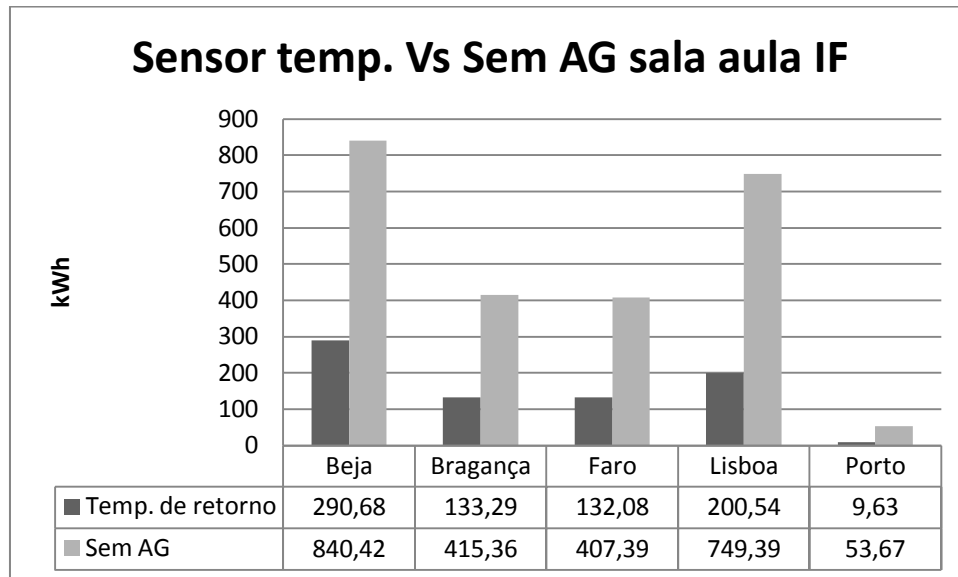


Gráfico 16 - Comparação entre valores para o arrefecimento total com e sem arrefecimento gratuito controlado por sensor. Valores para a sala de aula com inércia forte.

Finalmente na sala de aula tem-se Beja e Lisboa com diferenças virtualmente iguais, 550 e 549 kWh respetivamente, seguido de Bragança com 282 kWh e Faro com 275 kWh. O Porto, conforme tem-se verificado ao longo de todas as simulações, apresentam a menor diferença na poupança energética, com apenas 44 kWh.

O caso onde se pode verificar uma maior poupança no arrefecimento do edifício é num escritório localizado em Beja, tendo este inércia forte, sendo aliás o escritório o tipo de edifício onde se verificam os melhores resultados, tanto com inércia forte como fraca.

De notar também que em média os edifícios com inércia forte têm os melhores resultados, embora por uma margem reduzida, obtendo em média 324 kWh de poupança em comparação com os 286 kWh dos edifícios com inércia fraca.

Passa-se agora a analisar os resultados obtidos com a ventilação noturna. Esta técnica não é passível de simulação direta no *DesignBuilder*, no entanto foi conseguida através de uma ventilação natural controlada de modo a manter as temperaturas de conforto durante o dia, para durante a noite o sistema de climatização fazer a ventilação do espaço.

Apresentam-se os valores obtidos pela ventilação noturna através dos seguintes gráficos:

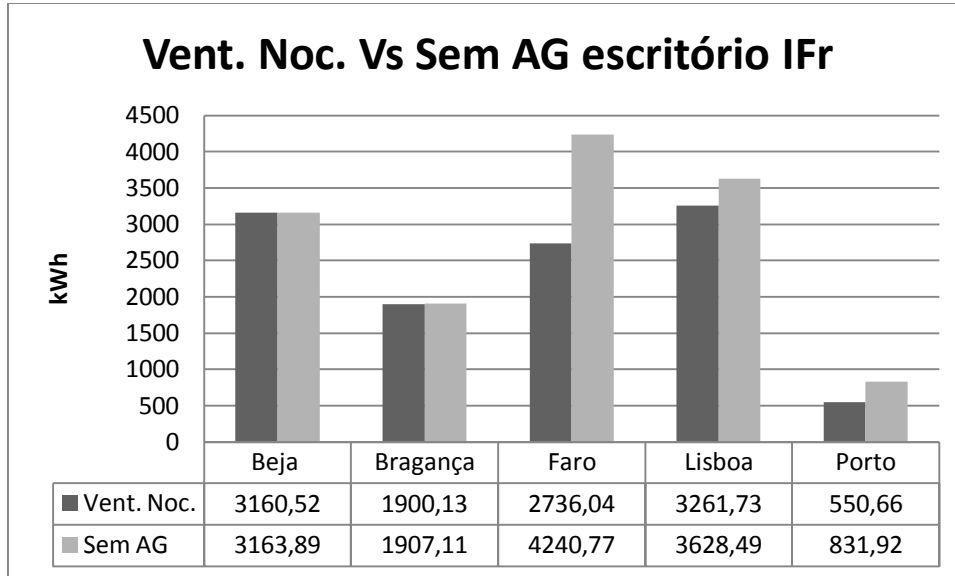


Gráfico 17 - Comparação entre valores para o arrefecimento total com e sem arrefecimento gratuito a partir de ventilação noturna. Valores para escritório com inércia fraca.

Em relação ao gráfico acima, temos um aumento significativo na poupança energética no Porto, com uma poupança anual de 281 kWh, que ao contrário de todos os casos anteriores, não é a poupança mais reduzida, sendo essa a de Beja, que tem o virtualmente mesmo valor com ou sem arrefecimento gratuito, por outro lado, Faro apresenta a maior poupança 1504 kWh, a maior diferença registada até ao momento, o que levanta questões sobre se poderá constituir um erro do próprio *software*. Finalmente tem-se Bragança e Lisboa com poupança de 7 e 367 kWh respetivamente. De notar que em média poupar-se-á 432 kWh, uma poupança superior à média recolhida para o arrefecimento gratuito por sensor.

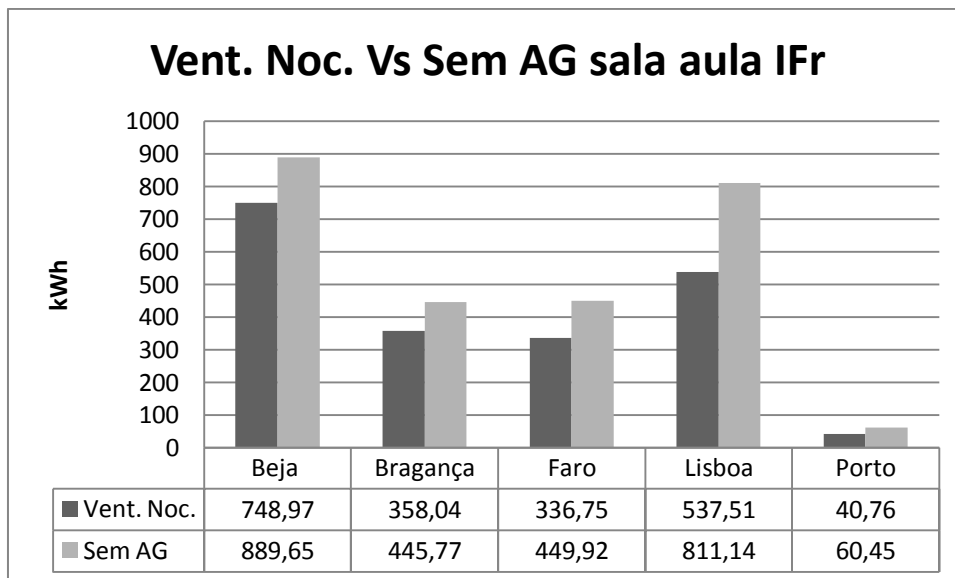


Gráfico 18 - Comparação entre valores para o arrefecimento total com e sem arrefecimento gratuito a partir de ventilação noturna. Valores para sala de aula com inércia fraca.

Já para a sala de aula temos Lisboa como sendo o que maior poupança beneficiará com 273 kWh, seguido de Beja com 141 kWh, Faro com 113 kWh, Bragança com 88 kWh e o Porto com 20 kWh.

De notar que em média poupar-se-á 279 kWh, uma poupança muito semelhante à registada para o arrefecimento gratuito com sensor, para o caso específico da inércia fraca.

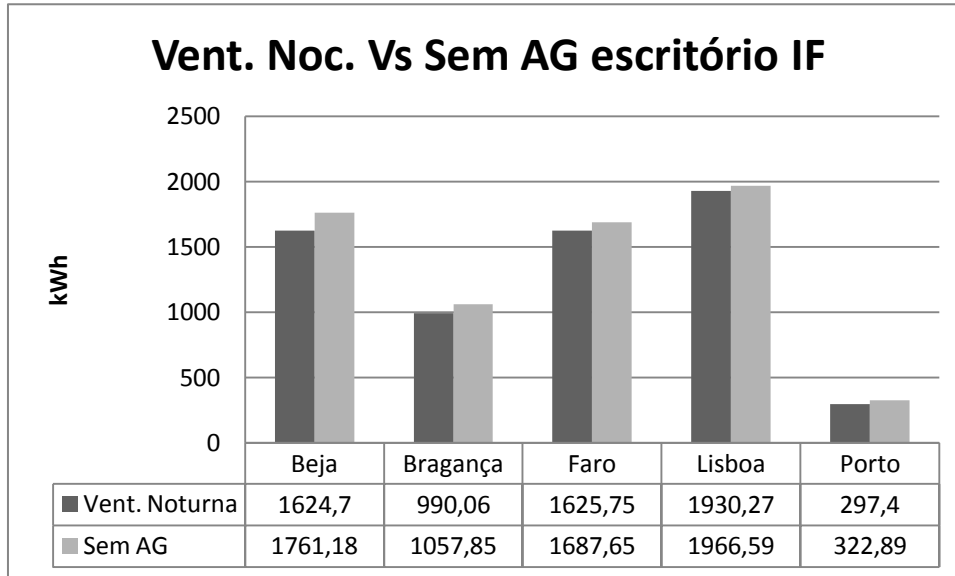


Gráfico 19 - Comparação entre valores para o arrefecimento total com e sem arrefecimento gratuito a partir de ventilação noturna. Valores para escritório com inércia forte.

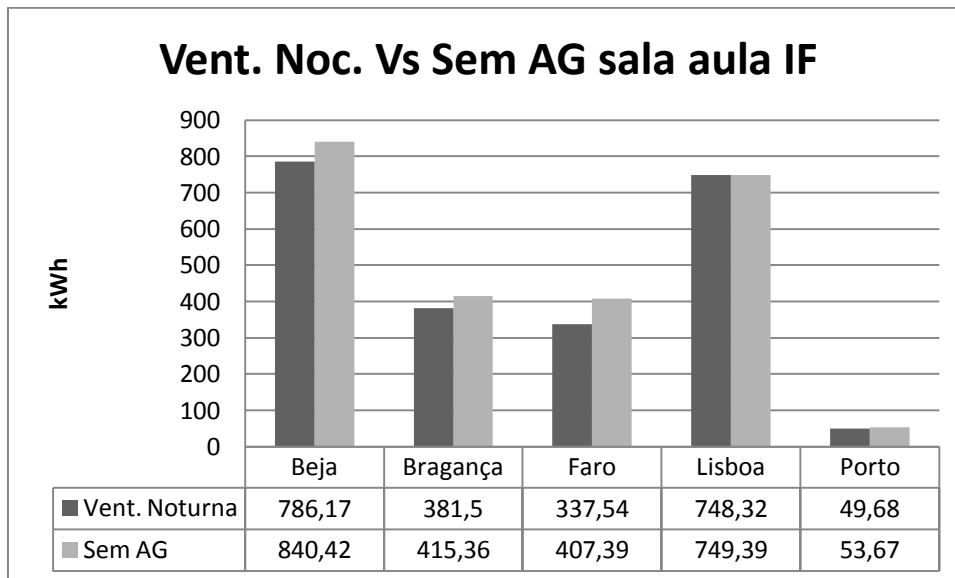


Gráfico 20 - Comparação entre valores para o arrefecimento total com e sem arrefecimento gratuito a partir de ventilação noturna. Valores para sala de aula com inércia forte.

Para os valores para os mesmo edifícios com inércia forte, temos que no escritório, por ordem crescente de poupança em kWh, Beja com 136, Bragança com 68, Faro com 62, Lisboa com 36 e Porto com 25. Poupanças muito menores às registadas para o mesmo perfil mas com inércia fraca.

Já para a sala de aula, temos Faro com a maior diferença de valores de arrefecimento total, com 70 kWh, seguido por Beja com 54 kWh, Bragança com 34 kWh, com Lisboa e Porto tendo poupanças negligenciáveis.

Em média teremos o escritório com uma poupança anual de 65 kWh e a sala de aula com 33 kWh, poupanças extremamente baixas se comparadas com as registadas anteriormente. Isso significa que a inércia terá um papel crucial na eficiência da ventilação noturna, mais preponderante do que na técnica anterior a esta, reduzindo drasticamente a sua importância se usada em edifícios com uma elevada capacidade para absorver mudanças de temperatura.

Se se comparar esta técnica com a de arrefecimento gratuito controlado por sensor, constata-se que a que utiliza sensores será, de uma maneira geral, mais eficaz a manter o espaço dentro das temperaturas de conforto sem que seja necessário usar mais energia para o efeito.

4.4 Resumo

Neste capítulo determinou-se como a localidade ou clima não fornece qualquer pista concreta sobre a maneira de prever a energia consumida para o arrefecimento de um dado edifício, por outro lado, a inércia do edifício fornece e influencia de maneira inversamente proporcional o arrefecimento total.

Para além disso, verificou-se no arrefecimento gratuito controlado por sensor, que o melhor sensor seria o de temperatura e ao comparar esse método com o da ventilação noturna, obteve-se melhores resultados com a primeira técnica. Em seguida estes resultados irão ser confirmados, ou não, através da simulação de um modelo mais semelhante à realidade.

5. Caso de estudo

5.1 Sumário

O objetivo deste capítulo prende-se com a necessidade de confirmar os resultados obtidos na anterior análise, sendo o modelo anteriormente utilizado extremamente simples, com uma só zona, é importante complementar essa análise com um edifício mais complexo, contrariando ou sublinhando os resultados obtidos no capítulo anterior.

5.3 Análise e comparação de resultados

Para uma confirmação dos resultados obtidos para um edifício com uma só zona, fez-se o mesmo tipo de simulações, mas desta feita, com um edifício que se poderia denominar como mais “realista”. O edifício escolhido pode ser encontrado nos Templates do *DesignBuilder*, o edifício de dois andares ilustrado na figura 31 abaixo.



Figura 31 - Edifício renderizado no *DesignBuilder*, o círculo no canto inferior esquerdo indica o norte.

O edifício terá por defeito inércia média, sendo o resto dos parâmetros inseridos os mesmos utilizados nas simulações anteriores para testar a veracidade dos resultados.

O sistema de climatização será diferente do anteriormente usado, uma vez que o PDE é mais apropriado para um edifício com uma só zona, passando este edifício a ter um sistema CAV multizona, que continuará a ter o recuperador de calor.

Passa-se então a apresentar gráficos da mesma forma que foram apresentados no capítulo anterior, começando por serem comparados os tipos de sensor, comparar o melhor tipo de sensor com os resultados sem arrefecimento gratuito e os resultados comparativos da ventilação noturna. Naturalmente todos os valores serão comparados com os obtidos anteriormente.

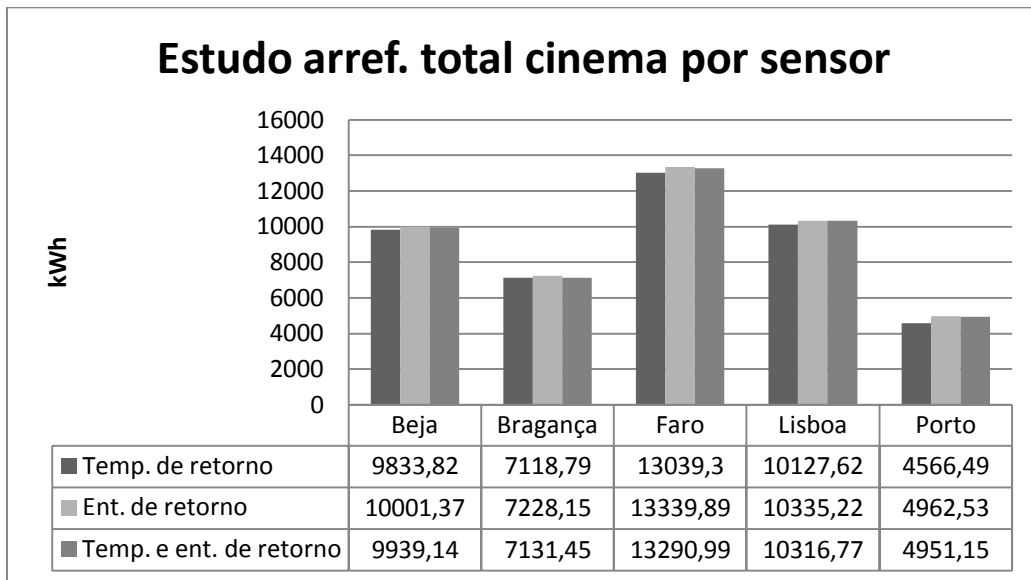


Gráfico 21 - Comparação entre os valores para o arrefecimento total, separados por tipo de sensor, para o cinema.

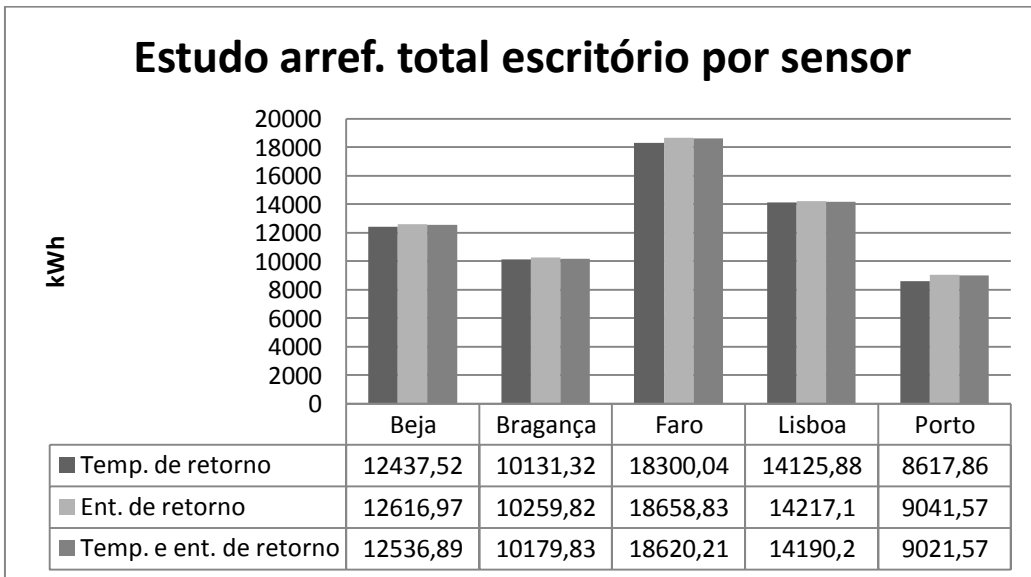


Gráfico 22 - Comparação entre os valores para o arrefecimento total, separados por tipo de sensor, para o escritório.

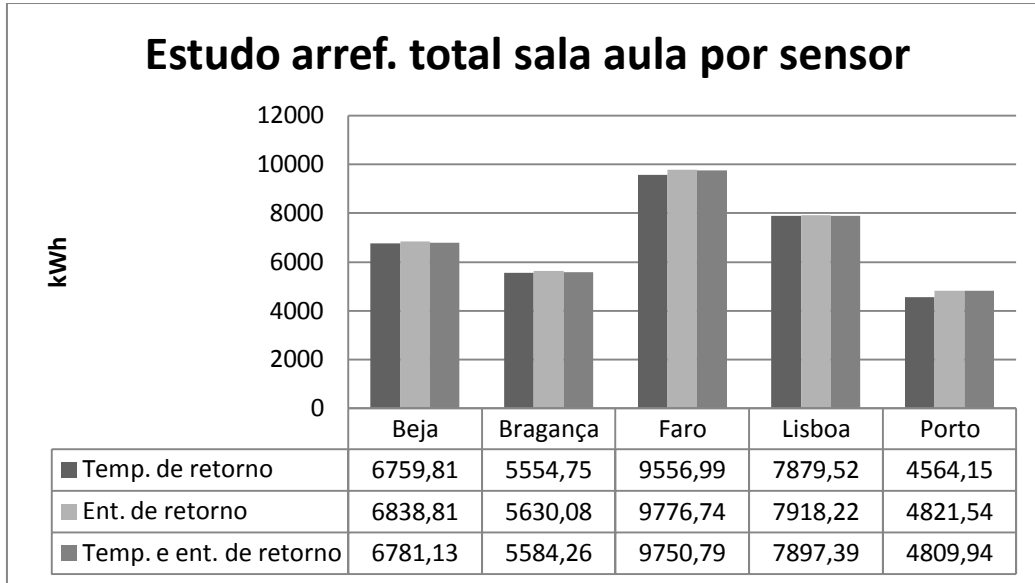


Gráfico 23 - Comparação entre os valores para o arrefecimento total, separados por tipo de sensor, para a sala de aula.

Algo que rapidamente se apercebe, olhando para os três gráficos anteriores, é o facto de a ordem, da localidade com maiores valores de arrefecimento total, para a com os valores mais baixos é sempre a mesma, contrariando a conclusão do capítulo 4, onde o clima denotou não ser um fator que tenha mantido essa coerência ao longo de todas as simulações. No entanto, o sensor que mais energia poupa continua a ser o sensor de temperatura.

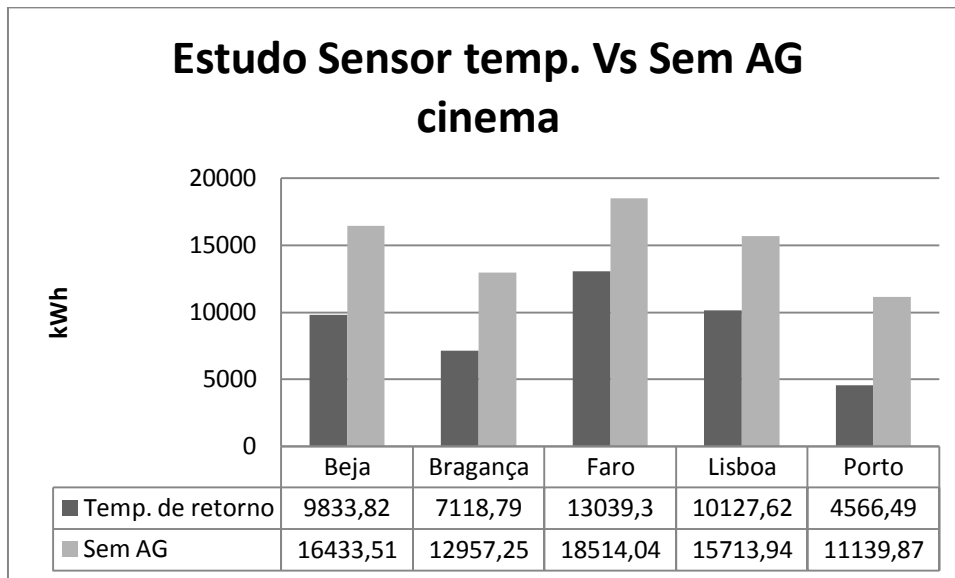


Gráfico 24 - Comparação entre valores para o arrefecimento total com e sem arrefecimento gratuito controlado por sensor.

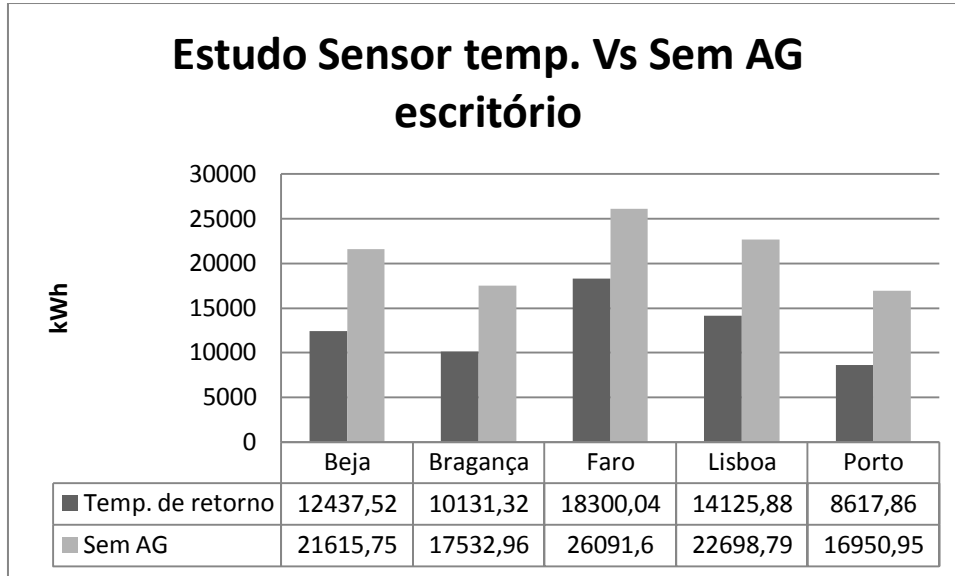


Gráfico 25 - Comparação entre valores para o arrefecimento total com e sem arrefecimento gratuito controlado por sensor.

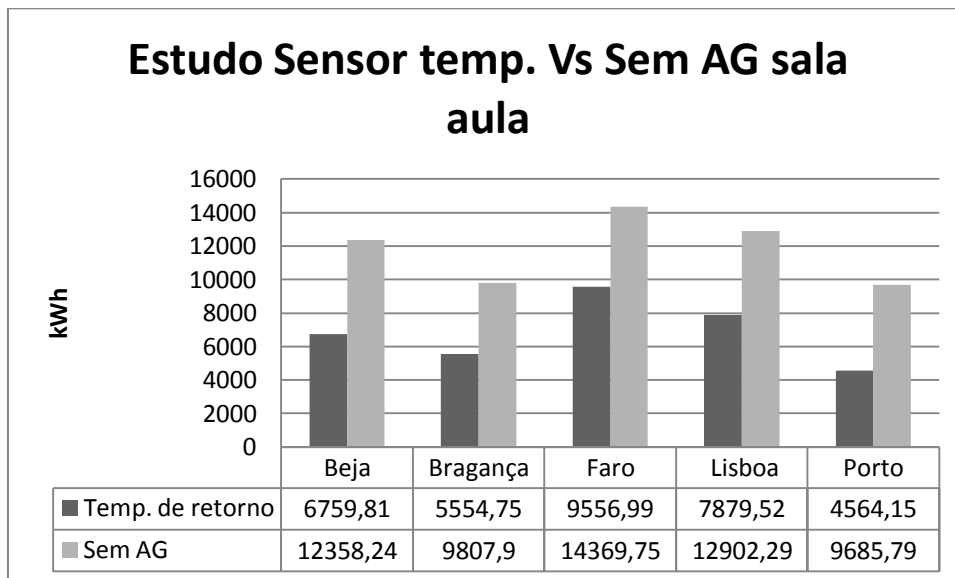


Gráfico 26 - Comparação entre valores para o arrefecimento total com e sem arrefecimento gratuito controlado por sensor.

Os valores de arrefecimento total para o sistema sem arrefecimento gratuito continuam, como seria expectável, a ser superiores aos obtidos com o sistema. Ao fazer-se uma média da poupança para o cinema, escritório e sala de aula, confirma-se a tendência do escritório ter os melhores resultados que em comparação com a sala de aula, por exemplo chega a ser quase o dobro, 8256 kWh para 4962 kWh.

Em seguida comparar-se-ão os valores para a ventilação noturna.

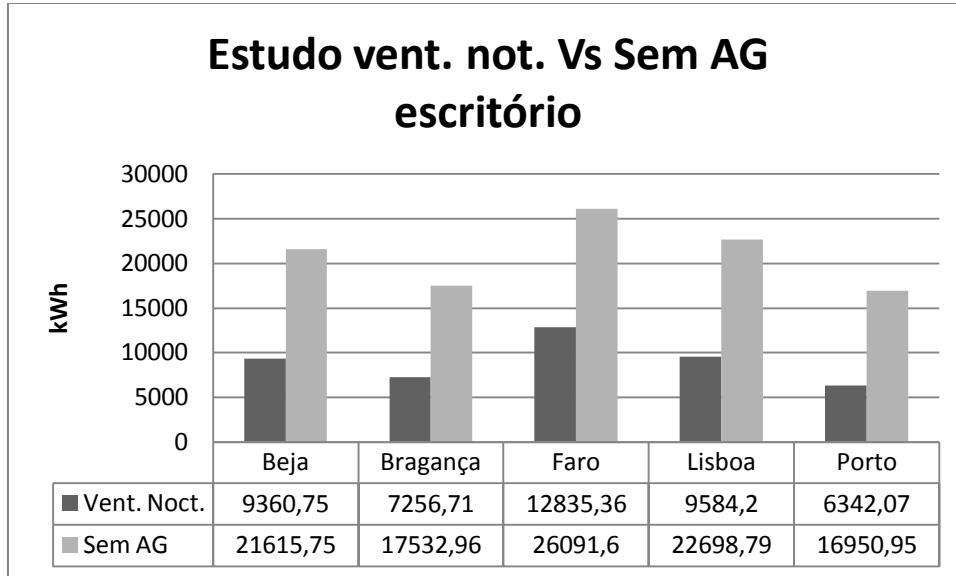


Gráfico 27 - Comparação entre valores para o arrefecimento total com e sem arrefecimento gratuito a partir de ventilação noturna para o escritório.

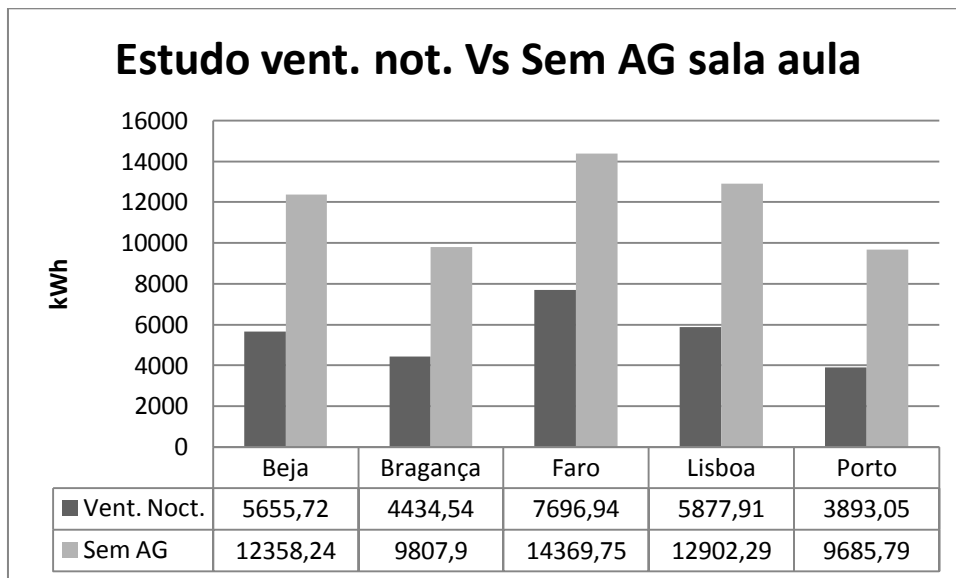


Gráfico 28 - Comparação entre valores para o arrefecimento total com e sem arrefecimento gratuito a partir de ventilação noturna para a sala de aula.

Nestes dois últimos gráficos, sublinham-se os resultados superiores no perfil de utilização do escritório em relação ao restante. Neste caso de estudo, ao contrário do modelo usado no capítulo 4, a ventilação noturna é claramente superior ao arrefecimento gratuito controlado por sensor de temperatura, com o primeiro a ter uma média de poupança de 9108 kWh anuais e o segundo com 6543 kWh.

5.3 Resumo

Os resultados obtidos por este caso de estudo sublinham a veracidade dos valores obtidos anteriormente, exceto na comparação entre os valores obtidos pelas duas diferentes técnicas, onde neste, a ventilação noturna tem melhores resultados. No próximo capítulo os resultados irão ser compilados de forma a obtermos uma imagem mais nítida do impacto do arrefecimento gratuito.

6. Conclusões

6.1 Sumário

Este capítulo final sintetiza as principais conclusões de correntes do trabalho realizado, através da compilação e interpretação de todos os dados recolhidos, explicando o impacto de cada parâmetro estudado, nomeadamente a localização (clima), inércia térmica, perfil de utilização e a técnica de arrefecimentos gratuito considerada.

6.2 Conclusões gerais

Que o arrefecimento gratuito iria produzir resultados melhores no que toca a arrefecimento, isso já era previsível, no entanto, não se sabia em que condições essas melhorias seriam mais evidentes, sendo a sua determinação um dos objetivos do presente trabalho. Seguindo a metodologia adotada para as simulações computacionais realizadas, descrita no capítulo 2, foram obtidos valores descritivos do potencial de *arrefecimento gratuito* em função da variação de cada um dos parâmetros identificados como mais relevantes, assim:

- **Localidade:** Se for necessário determinar qual o melhor sítio em Portugal, dentro das cidades simuladas, ou em zonas climáticas semelhantes, há uma que se destaca, Beja, sendo praticamente sempre a cidade que apresenta uma maior poupança energética, mesmo no caso de estudo. Do outro lado do espectro está o Porto como sendo a cidade com os piores resultados de uma maneira consistente, esse facto estará sem dúvida relacionada com a diferença de temperatura entre o dia e a noite, sendo o Porto mais ameno que Beja.
- **Inércia:** Apesar de influenciar a energia consumida pela climatização do edifício, apresentando um maior consumo à medida que a inércia decresce, isso não determina necessariamente que uma menor inércia produzirá melhores ou piores resultados em termos de arrefecimento gratuito, não se conseguiu identificar/quantificar uma correlação de forma clara e inequívoca.
- **Perfil de utilização:** Dos três perfis analisados, cinema, sala de aula e escritório, o que apresentou melhores resultados, independentemente das outras variáveis utilizadas, foi o escritório. Apresentou também a melhor diferença entre arrefecimento total com arrefecimento gratuito e sem arrefecimento gratuito.
- **Técnica a usar:** Infelizmente este parâmetro não é tão claro como o perfil de utilização, se por um lado, no primeiro edifício simulado temos que a técnica de arrefecimento gratuito que utiliza o sensor como modo de controlo seria a melhor opção, por uma pequena margem, o segundo edifício claramente mostrou que a ventilação noturna apresenta melhores resultados. Temos de considerar no entanto, que na maior parte dos casos, a situação favorável para o arrefecimento gratuito irá ocorrer durante a noite, logo a resposta mais adequada poderá ser a utilização de uma técnica que complemente tanto a ventilação noturna como o arrefecimento gratuito, i.e., com sobreventilação noturna para utilizar o arrefecimento gratuito controlado por sensor durante o dia.

Em suma, o arrefecimento gratuito, independentemente da técnica utilizada ou do material de construção utilizado, terá mais hipóteses de sucesso em climas mais quentes, em edifícios cuja função permita a sua desocupação durante a noite e que ao mesmo tempo não sofra grandes flutuações nesse aspeto ao longo do ano.

Tendo isso em conta e considerando o arrefecimento gratuito controlado por sensor, pode-se calcular a média de poupança energética para Beja, a cidade com os melhores resultados e o Porto, a cidade com os piores resultados, como apresentado nas seguintes tabelas:

Tabela 23 - Poupança anual média para Beja e Porto no primeiro edifício simulado.

Edifício 1	Beja (kWh.ano)	Poupança (€)	Porto (kWh.ano)	Poupança (€)
Vent. Diurna	535	88	27	4
Vent. Noc.	83	14	82	14

Tabela 24 - Poupança anual média para Beja e Porto no segundo edifício simulado.

Edifício 2	Beja (kWh.ano)	Poupança (€)	Porto (kWh.ano)	Poupança (€)
Vent. Diurna	8407	1387	7659	1263
Vent. Noc.	6702	1105	5787	955

Na tabela 23 os valores são compreensivelmente baixos devido à própria dimensão e complexidade do edifício, obtendo no melhor dos casos 88 euros de poupança anual na energia de arrefecimento e no pior 4 euros. Já na tabela 24, sendo o edifício simulado mais complexo, o que se pode poupar em euros no consumo energético irá rondar os 1000 euros anuais, mesmo no pior dos casos.

Por último é importante notar que o método descrito no capítulo 1.4.6 não se aplica nas circunstâncias destas simulações.

6.3 Trabalhos futuros

Para trabalhos futuros seria importante analisar mais técnicas de arrefecimento gratuito que não foi possível fazer aqui devido a limitações de *software* que futuramente poderão ser emendadas, nomeadamente a impossibilidade do programa de simular o arrefecimento evaporativo, visto no capítulo 1.4.2.4, tendo sido mesmo considerada como uma lacuna a corrigir num futuro próximo por um membro do *staff* do site oficial do *DesignBuilder*.

Para além disso utilizar um só *output*, nomeadamente o *Total Cooling*, como base para todas as comparações entre técnicas, localidades, inércias, etc, serve o propósito da tese, mas ao mesmo tempo limita-a pois apenas estuda os efeitos do arrefecimento gratuito pelo ponto de vista do arrefecimento .

No capítulo 5, foi feita uma simulação num edifício que embora mais semelhante a um que possa existir, continua a ser meramente virtual. Penso que poderá ser interessante simular um edifício que realmente exista, por exemplo, o departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro e determinar o potencial que diferentes técnicas de arrefecimento gratuito poderiam ter na poupança energética, tendo já dados do edifício sem estas.

7. Bibliografia

1. Shahi, R.V., *Energy Efficiency in Buildings*, 2006, Secretary, Government of India, Ministry of Power: New Dehli.
2. D.J. Harris, R.M., *The importance of energy efficiency in buildings* The Bulletin on Energy Efficiency 2006. 6(4-6).
3. (EEA), E.E.A., *Greenhouse gas emissions in the EU-27 by sector in 2008, and changes between 1990 and 2008*, SOER-Fig_2-4_ID-1114-1115.eps.75dpi, Editor 2011: www.eea.europa.eu.
4. Vick, A. *How does carbon dioxide gas effect oceans & the atmosphere?* 2004.
5. Keeling, C.D., *Tyler Prize Presentation*, 2005.
6. Energy, I.H. *Free Cooling* [13/07/2012]; Available from: <http://www.idhvac.co.uk/uploads/Free%20Cooling.pdf>.
7. Silva, P.C.P.d., *Análise do Comportamento Térmico de Construções não Convencionais através de Simulação em VisualDOE*, in *Engenharia Civil*2006, Universidade do Minho. p. 108.
8. Nikolai Artmann, H.M., Per Heiselberg, *Potential for passive cooling of buildings by night-time ventilation in present and future climates in Europe*, in *The 23rd Conference on Passive and Low Energy Architecture*2006: Geneva, Switzerland.
9. Hardy, M. *A Practical Guide to Free Cooling, Alternative Cooling, Night Cooling and Low Energy Systems for Air Conditioning Systems* 1998.
10. Eficiencia-Energetica *Estratégias Bioclimáticas e Sistemas Passivos*. 2012.
11. Center, A.S. *Passive Solar Heating & Cooling Manual*. 3.
12. Opalcat, *What they are & How they work - Swamp Coolers 101*, 2007.
13. Energy, U.S.D., *EERE Program News*. 2008.
14. Chirambadam, A. *Deep Lake Water Cooling*. 2011 [24/07/2012]; Available from: <http://www.scribd.com/doc/51538296/seminar-deep-lake-water-cooling>.
15. Agency, E.P., *Natural Processes in the Great Lakes*, 1995: An Environmental Atlas and Resource Book.
16. Ferreira, H.M.F.C., *Desempenho energético de coberturas ajardinadas em edifícios*, in *Engenharia Mecânica*2011, Aveiro. p. 17-18.
17. Parizotto, S.R.L., *Investigation of green roof thermal performance in temperate climate: A case study of an experimental building in Florianópolis city, Southern Brazil*. 2008.
18. Stefan, *Beautiful and Green Icelandic Turf Houses*, 2010: www.homedit.com.

19. Office, S.C.E. *Landscaping for Energy Efficiency* [25/07/2012]; Available from: <http://www.builditsolar.com/Projects/Cooling/Shading/EB%20Landscaping%20for%20energy%20efficiency.pdf>.
20. RSECE, *Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios*. 2006: p. 23.
21. ADENE, *Perguntas & Respostas sobre o RSECE - Energia*, 2011. p. 3, 30.
22. Bhatia, A., *Cooling Load Calculations and Principles*. p. 4.
23. Steven Liescheidt, P.E., CCS, CCPR, *Economizers in Air Handling Systems*. p. 3.
24. DesignBuilder. *DesignBuilder Simulation* [08/08/2012]; Available from: <http://www.designbuilder.co.uk/content/view/7/13/>.
25. Carrier. *Hourly Analysis Program (HAP) 8760 Hour Load & Energy Analysis* [08/08/2012]; Available from: http://www.commercial.carrier.com/commercial/hvac/general/1,,CLI1_DIV12_ETI496.00.html.
26. TRNSYS. *Trnsys Features* [08/08/2012]; Available from: <http://www.trnsys.com/features/>.
27. Eurosis. *Directory of Simulation Software and Tools (Alphabetical Listing)* [08/08/2012]; Available from: <http://www.eurosis.org/cms/?q=node/1318>.
28. Cristian Ghiaus, F.A., *Potential for free-cooling by ventilation*. 2005: p. 404-406.
29. DesignBuilder, *DesignBuilder EnergyPlus Simulation Documentation for DesignBuilder v3.0*, 2011.
30. Management, N. *Direct Expansion Air Conditioning 2009* [21/10/2012]; Available from: <http://www.nrgmanagement.ca/direct-expansion-air-conditioning->.
31. RCCTE, *Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios*. 2006: p. 15.
32. Gonçalves, B.S., *Simulação Dinâmica do Comportamento Térmico do Sheraton Lisboa Hotel & SPA*, in *Engenharia Mecânica* 2010, Universidade Técnica de Lisboa. p. 35.
33. Lima, M.A.d.S., *Armazenamento de Energia Térmica em Componentes de Edifícios sobre os quais Incide Radiação Solar Directa*, in *Engenharia Térmica* 1995, Universidade do Porto. p. 7.
34. ACEPE, *Caracterização do Comportamento Térmico dos Edifícios*.
35. DiLaura, D.D., *The Lighting Handbook: Reference & Application* 2011.