



**Tiago Miguel Pinto  
Monteiro**

**Análise técnico-económica do armazenamento de  
energia térmica em sistemas AVAC**



**Tiago Miguel Pinto  
Monteiro**

**Análise técnico-económica do armazenamento de  
energia térmica em sistemas AVAC**

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 Doutor Nelson Amadeu Dias Martins, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro.

## **o júri**

Presidente

**Prof. Doutor Vítor António Ferreira da Costa**  
Professor Associado C/ Agregação da Universidade de Aveiro

Arguente

**Prof. Doutor Vítor Manuel Ferreira Moutinho**  
Professor Auxiliar da Universidade de Aveiro

Orientador

**Prof. Doutor Nelson Amadeu Dias Martins**  
Professor Auxiliar da Universidade de Aveiro

## **agradecimentos**

Agradeço ao meu orientador científico Professor Doutor Nelson Martins, pelo apoio, disponibilidade e sugestões fundamentais ao desenvolvimento da minha dissertação.

À Universidade de Aveiro e em particular ao Departamento de Engenharia Mecânica, por me acolherem nesta fase importante da minha vida, por toda a ajuda disponibilizada e pelos ensinamentos que me permitiram evoluir pessoal e academicamente.

Aos meus fantásticos amigos que me acompanharam direta e indiretamente neste percurso da minha vida, por todo os momentos passados na vossa companhia.

À Liliana, pelo amor, pela cumplicidade, pela motivação, pela insistência, por me teres acompanhado nos últimos 8 anos e por seres o meu porto seguro.

À minha mãe, ao meu pai, e aos meus irmãos, por todo amor e carinho, pois sem eles este momento nunca teria acontecido.

A todos vós o meu muito obrigado.

## palavras-chave

armazenamento de energia térmica, armazenamento de calor latente, banco de gelo, sistemas de AVAC, sistemas de energia renovável, painéis fotovoltaicos, gerador eólico, autoconsumo, nZEB

## resumo

O desenvolvimento económico resultou num aumento do consumo de energia primária, sendo o setor dos edifícios um dos maiores consumidores a nível europeu. A União Europeia tem vindo a propor medidas que obrigam este setor a melhorar o seu desempenho energético. Para tal, desenvolveram-se políticas energéticas e diretivas comunitárias de eficiência energética nas quais se pode enquadrar a produção de energia de forma local e descentralizadas. A EPBD revista, publicada em 2010, veio obrigar os estados membros (incluindo Portugal) a tomar medidas. Algumas dessas medidas obrigam a que os edifícios comecem a tornar-se *nearly zero-energy building* a partir de 2018. Para que seja cumprido esse requisito, será necessário a utilização de sistemas de energia renovável nos edifícios, porém estes possuem um enorme problema, a sua intermitência. A utilização de sistemas de armazenamento de energia anula esse problema e permite diminuir as perturbações que possam surgir na rede elétrica devido ao excesso de energia produzida.

No presente trabalho estudou-se a viabilidade energética e económica do armazenamento de energia térmica em sistemas de AVAC e a sua importância quando integrado com sistemas de energia renovável.

No desenvolvimento do trabalho recorreu-se às ferramentas de simulação DesignBuilder e EnergyPlus. Para estudar o problema considerou-se uma fração autónoma de um edifício com vários andares, estando este localizado na cidade do Porto. Como componente de armazenamento de energia térmica foi optado pela utilização de um banco de gelo, pois é uma tecnologia bastante desenvolvida e de fácil aplicação nas ferramentas de simulação.

Numa primeira análise foi verificado como um banco de gelo permitia deslocar, para períodos noturnos, as cargas elétricas associados às necessidades de arrefecimento, onde o preço eletricidade é muito menor, permitindo também diminuir as necessidades de pico exigidas à rede durante o período diurno.

Numa segunda fase foram introduzidos sistemas de energia renovável e integrados com o banco de gelo. Foi analisado uma estratégia de autoconsumo, onde o excedente de produção poderia ser injetado na rede ou utilizado no chiller para carregar o banco de gelo. Constatou-se que a integração destas duas componentes permitia diminuir a energia comprada e vendida à rede, podendo o utilizador retirar um proveito económico considerável desta implementação, e também tornar o sistema elétrico mais equilibrado, permitindo funcionar de uma forma eficiente e homogênea.

**keywords**

thermal energy storage, latent heat storage, ice storage, HVAC systems, energy efficiency, renewable energy systems, photovoltaic panels, eolic generator, self-consumption, nZEB

**abstract**

The economic development occasioned a large intensification of energy consumption; in Europe, buildings are pointed as great responsible for this increase. European Union has, therefore, start proposing actions to implement improvements in the energetic balance of buildings. For that, the EU has developed energy policies and directives of energy efficiency for local and decentralized energy production. The most important document is EPBD recast of 2010 that stated that every member countries had to improve their regulations and policies. In what concerns to Portugal, those actions required that service buildings should start to be converted in nearly zero-energy building until 2018. To accomplish this requirement, the use of renewable energy systems will be necessary in buildings, but they have a huge problem, its intermittency. The use of energy storage systems cancels this problem and reduces disturbances that may occur in the electrical grid due to excess of energy production.

In the present work we studied the energy and economic viability of thermal energy storage in HVAC systems and their importance when integrated with renewable energy systems.

The software used to perform simulations was DesignBuilder and EnergyPlus. The simulation was accomplished by means of a test cell with both adiabatic floor and roof to simulate an isolated building with several floors that would be located in Porto. As thermal energy storage component was chosen the use of ice storage, since it is a well developed technology and easy to use in simulation tools.

In a first analysis was verified that a ice storage allowed the shifting of electrical charges, associated with the cooling requirements, to night shifts, where the electricity price is much lower, allowing also to decrease the peak demand during the daytime. In a second phase, renewable energy systems were introduced and integrated with the ice storage. It was analyzed a self-consumption strategy, where the excess of production could be injected into the grid or used in the chiller to charge the ice storage. It was found that the integration of these two components allows reduction of energy purchased and sold to the grid, allowing the user to take a considerable economic advantage of this implementation, and also to make the electrical system more balanced, allowing it to work in an efficient and uniform way.

## Conteúdo

Lista de Tabelas .....	iii
Lista de Figuras.....	v
Lista de Símbolos e Acrónimos .....	vii
1 Introdução.....	1
1.1 Contextualização .....	1
1.1.1 Sistemas de AVAC .....	2
1.2 Objetivos do trabalho .....	3
1.3 Revisão bibliográfica.....	4
1.3.1 Armazenamento de energia térmica na envolvente do edifício – Inercia Térmica.....	4
1.3.2 Armazenamento de energia térmica em sistemas de AVAC.....	7
1.3.3 Integração de energias renováveis nos edifícios.....	11
1.3.4 Estratégias para a promoção da eficiência energética de sistemas de AVAC .....	14
1.3.4.1 Métodos de controlo de sistemas de AVAC .....	15
1.3.4.2 Sombreamento.....	19
1.3.5 Simulação dinâmica de edifícios .....	21
1.3.6 Síntese .....	22
1.4 Contributo da dissertação .....	25
1.5 Organização do documento.....	26
2 Metodologia de análise.....	28
2.1 Caracterização das componentes comuns à simulação .....	28
2.1.1 Dados climáticos.....	28
2.1.2 Caracterização geométrica e dimensional.....	29
2.1.3 Caracterização das opções construtivas.....	30
2.1.4 Caracterização das condições operacionais: ocupação, equipamentos e sistemas.....	31
2.2 Custo da eletricidade .....	36
2.3 Implementação do banco de gelo .....	38
2.4 Implementação dos sistemas de energia renovável.....	43
2.4.1 Legislação sobre a venda de energia elétrica em Portugal .....	49

2.5	Procedimentos .....	51
2.5.1	Aplicação do banco de gelo .....	51
2.5.2	Aplicação dos sistemas de energia renovável .....	52
3	Resultados e análise .....	54
3.1	Perfil diário .....	54
3.1.1	Aplicação do banco de gelo .....	54
3.1.1.1	Otimizações realizadas à instalação inicial .....	62
3.1.2	Aplicação dos sistemas de energia renovável .....	74
3.2	Perfil Semanal .....	86
3.3	Retorno de investimento .....	88
3.4	Síntese do capítulo .....	94
4	Conclusões e trabalho futuro .....	100
4.1	Conclusões gerais .....	100
4.2	Sugestões de trabalho futuro .....	103
	Referências bibliográficas .....	105
	Anexo A – Perfis de utilização do chiller .....	112
	Anexo B – Preços dos bancos de gelo (91) .....	116



## Lista de Tabelas

Tabela 1 - Características dos diferentes tipos de TES.....	11
Tabela 2 - Dados climáticos para a cidade do Porto.....	29
Tabela 3 - Materiais construtivos da envolvente do edifício.....	31
Tabela 4 - Tarifário EDP- Negócios (sem débito direto) (72).....	37
Tabela 5 - Custo associado à potência contratada.....	37
Tabela 6 - Nomenclatura da equação de carga e descarga do banco de gelo.....	41
Tabela 7 - Constantes da equação de carga e descarga do banco de gelo.....	42
Tabela 8 - Características relevantes do gerador eólico.....	45
Tabela 9 - Nomenclatura da equação de produção de energia do gerador eólico.....	45
Tabela 10 - Constantes da equação de produção de energia do gerador eólico.....	46
Tabela 11 - Nomenclatura e valores inseridos para o cálculo da potência elétrica produzida pelos painéis fotovoltaicos.....	49
Tabela 12 - Análise sumária dos principais requisitos exigidos às UPAC (79).....	50
Tabela 13 - Consumos energéticos para o <i>design day</i> - todos os casos.....	60
Tabela 14 - Consumos energéticos para o horário de verão - todos os casos.....	60
Tabela 15 - Consumos energéticos para o <i>design day</i> , antes e depois de ser otimizado – Caso 1.....	64
Tabela 16 - Consumos energéticos para o <i>design day</i> , antes e depois de ser otimizado – Caso 2.....	65
Tabela 17 - Consumos energéticos para o <i>design day</i> , antes e depois de ser otimizado – Caso 3.....	66
Tabela 18 - Consumos energéticos para o <i>design day</i> , antes e depois de ser otimizado – Caso 4.....	68
Tabela 19 - Consumos energéticos para o <i>design day</i> , antes e depois de ser otimizado – Caso 5.....	70
Tabela 20 - Alteração efectuadas aos casos estudos.....	70
Tabela 21 - Consumos energéticos para o <i>design day</i> , otimizado - todos os casos.....	71
Tabela 22 - Consumos elétrico dos chillers no horário de verão, otimizado - todos os casos.....	72
Tabela 23 - Consumos energéticos para o horário de verão, otimizado - todos os casos.....	72
Tabela 24 - Custo da potência contratada – todos os casos.....	73
Tabela 25 - Custo para a tarifa simples e tri-horária.....	74
Tabela 26 - Produção de eletricidade para o horário de verão.....	76
Tabela 27 - Produção e consumo de eletricidade para o <i>design day</i> – Caso 1.....	76
Tabela 28 - Produção e consumo de eletricidade para o dia 14 Julho – Caso 1.....	77
Tabela 29 - Produção e consumo de eletricidade para o <i>design day</i> – Caso 2.....	78
Tabela 30 - Consumo do chiller do banco de gelo e a eletricidade produzida em excesso disponível para carregar o banco de gelo – Caso 2.....	79

Tabela 31 - Produção e consumo de eletricidade para o <i>design day</i> , caso seja anulado o consumo do chiller do banco de gelo – Caso 2 .....	79
Tabela 32 - Produção e consumo de eletricidade para o <i>design day</i> , caso seja anulado o consumo do chiller do banco de gelo – Caso 3 .....	80
Tabela 33 - Produção e consumo de eletricidade para o <i>design day</i> , caso seja anulado o consumo do chiller do banco de gelo – Caso 4 .....	81
Tabela 34 - Produção e consumo de eletricidade para o <i>design day</i> , caso seja anulado o consumo do chiller do banco de gelo – Caso 5 .....	83
Tabela 35 - Produção e consumo de eletricidade para o <i>design day</i> - todos os casos.....	83
Tabela 36 - Produção e consumo de eletricidade para todos os meses do horário de verão – todos os casos .	84
Tabela 37 - Produção e consumo de eletricidade para o horário de verão - todos os casos.....	85
Tabela 38 - Consumos energéticos para o horário de verão, otimizado (perfil semanal) - todos os casos .....	86
Tabela 39 - Produção e consumo de eletricidade para o horário de verão (perfil semanal) - todos os casos ..	87
Tabela 40 - Consumos energéticos para o horário de inverno, otimizado (perfil diário) .....	88
Tabela 41 - Consumos energéticos para o horário de inverno, otimizado (perfil semanal).....	89
Tabela 42 - Modelos, capacidades e preços da instalação dos bancos de gelo.....	89
Tabela 43 - Capacidade e preços dos bancos de gelo estudados .....	89
Tabela 44 - Custos, poupança e <i>payback</i> da instalação somente com o banco de gelo (diário) .....	90
Tabela 45 - Custos, poupança e <i>payback</i> da instalação com banco de gelo e sistemas de energia renovável (diário) .....	91
Tabela 46 - Custos, poupança e <i>payback</i> da instalação somente com o banco de gelo (semanal) .....	91
Tabela 47 - Custos, poupança e <i>payback</i> da instalação com banco de gelo e sistemas de energia renovável (semanal).....	92
Tabela 48 - <i>Payback</i> da instalação considerando a inflação anual de 1% e 3% – Caso 5 .....	92
Tabela 49 - Custos, poupança e <i>payback</i> da instalação com banco de gelo e sistemas de energia renovável (perfil diário) – Caso 1 não otimizado .....	93

## Lista de Figuras

Figura 1 - Exemplo de BIPV e BAPV .....	12
Figura 2 - Esquema de funcionamento do sistema fotovoltaico com aproveitamento térmico passivo indireto (26).....	13
Figura 3- Classificação dos métodos de controlo para sistemas de climatização (33) .....	16
Figura 4 - Perspetiva sul e oeste do edifício modelado no DesignBuilder .....	30
Figura 5 - Perspetiva norte e este do edifício modelado no DesignBuilder .....	30
Figura 6 - Perfil de ocupação.....	32
Figura 7 - Perfil dos equipamentos eletrónicos. ....	33
Figura 8 - Perfil de Iluminação.....	34
Figura 9 - Perfil de ventilação .....	34
Figura 10 - Sistema de AVAC de referência (VAV <i>Reheat, Air-cooled Chiller</i> ).....	35
Figura 11 - Perfil de Climatização.....	36
Figura 12 - Os três períodos horários ao longo do dia (verão) .....	37
Figura 13 - Os três períodos horários ao longo do dia (inverno) .....	38
Figura 14 - Circuito de arrefecimento do sistema de AVAC após introdução do banco de gelo .....	40
Figura 15 - Esquema de um modelo <i>TwoWayCommonPipe</i> .....	40
Figura 16 - Gráfico da fração carregada do banco de gelo para um chiller de 20 kW.....	42
Figura 17 - Potencial eólico (velocidade média do vento a 80m) a) (73) e solar b) (74) para Portugal continental.....	44
Figura 18 - Ilustração do problema em triângulos retângulos .....	47
Figura 19 - Ilustração da distância mínima entre painéis. ....	48
Figura 20 - Edifício de estudo com painéis solares. ....	48
Figura 21 - Necessidade de arrefecimento ao longo do dia - Caso 1.....	55
Figura 22 - Consumos energéticos ao longo do dia - Caso 1.....	55
Figura 23 - Necessidade de arrefecimento ao longo do dia - Caso 2.....	56
Figura 24 - Consumos energéticos ao longo do dia - Caso 2.....	56
Figura 25 - Necessidade de arrefecimento ao longo do dia - Caso 3.....	57
Figura 26 - Consumos energéticos ao longo do dia - Caso 3.....	57
Figura 27 - Necessidade de arrefecimento ao longo do dia - Caso 4.....	58
Figura 28 - Consumos energéticos ao longo do dia - Caso 4.....	59
Figura 29 - Necessidade de arrefecimento ao longo do dia - Caso 5.....	59
Figura 30 - Chiller: Potência e COP – Caso 1 .....	62
Figura 31 - Chiller principal: Potência e COP – Caso 1 otimizado .....	63

Figura 32 - Consumos energéticos ao longo do dia, antes e depois de ser otimizado – Caso 1 .....	63
Figura 33 - Consumos energéticos ao longo do dia, antes e depois de ser otimizado – Caso 2 .....	64
Figura 34 - Consumos energéticos ao longo do dia, antes e depois de ser otimizado – Caso 3 .....	66
Figura 35 - Necessidade de arrefecimento ao longo do dia, para o caso otimizado - Caso 4 .....	67
Figura 36 - Consumos energéticos ao longo do dia, antes e depois de ser otimizado – Caso 4 .....	67
Figura 37 - Necessidade de arrefecimento ao longo do dia, para o caso otimizado - Caso 5 .....	69
Figura 38 - Consumos energéticos ao longo do dia, antes e depois de ser otimizado – Caso 5 .....	69
Figura 39 - Produção de eletricidade proveniente dos sistemas eólico e solar. ....	75
Figura 40 - Produção e consumo de eletricidade – Caso 1 .....	76
Figura 41 - Produção e consumo de eletricidade – Caso 2 .....	77
Figura 42 - Produção e consumo de eletricidade – Caso 3 .....	80
Figura 43 - Produção e consumo de eletricidade – Caso 4 .....	81
Figura 44 - Produção e consumo de eletricidade – Caso 5 .....	82

## Lista de Símbolos e Acrónimos

AVAC	Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado
AIE	Agência Internacional de Energia
BAPV	<i>Building attached photovoltaics</i>
BIPV	<i>Building integrated photovoltaics</i>
COP	<i>Coefficient of performance</i>
EPBD	<i>Energy Performance Building Directive</i>
ERSE	Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos
LHS	<i>Latent heat storage</i>
LNEG	Laboratório Nacional de Energia e Geologia
MPC	<i>Model predictive control</i>
nZEB	<i>Nearly Zero-Energy Building</i>
OCDE	Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Económico
OMIE	Operador do Mercado Ibérico de Energia
PCM	<i>Phase-change material</i>
PID	Controlo Proporcional-Integral-Derivativo
RESP	Rede elétrica de serviço público
SCE	Sistema de Certificação Energética de Edifícios
SEN	Sistema Elétrico Nacional
SHS	<i>Sensible heat storage</i>
TABS	<i>Thermally Activated Building System</i>
TES	<i>Thermal energy storage</i>
THS	<i>Thermochemical heat storage</i>
UE	União Europeia
UPAC	Unidade produtora para autoconsumo
$a$	Altura (m)
$A_r$	Área varrida do rotor ( $m^2$ )
$Asup$	Área total da superfície ( $m^2$ )
$fact$	Fração da superfície com células solares
$G_T$	Total da radiação incidente nos painéis ( $W/m^2$ )
$OMIE_m$	Resultante da média aritmética simples dos preços de fecho do OMIE (€/kWh)
$P$	Potência elétrica produzida pelos fotovoltaicos (W)
$q$	Taxa de transferência de calor instantânea ( $W/m^2$ )
$Q_{arm}$	Capacidade total de calor latente do banco de gelo (J)
$T_{entrada}$	Temperatura de entrada do banco de gelo ( $^{\circ}C$ )
$T_{saída}$	Temperatura de saída do banco de gelo ( $^{\circ}C$ )
$T_{solidificação}$	Temperatura de solidificação ( $^{\circ}C$ )
$\Delta T_{nominal}$	Diferença de temperatura nominal ( $^{\circ}C$ )
$V$	Velocidade do vento (m/s)
$x$	Distância mínima entre fileiras (m)
$\rho_{local}$	Densidade do ar à temperatura do rotor ( $kg/m^3$ )
$\theta$	Ângulo de inclinação ( $^{\circ}$ )
$\varphi$	Ângulo mínimo do sol no solstício de inverno ( $^{\circ}$ )
$\eta_{cel}$	Eficiência do módulo
$\eta_{inv}$	Eficiência do inversor



# Capítulo 1

## 1 Introdução

### 1.1 Contextualização

Nas últimas décadas tem existido um aumento significativo do consumo de energia a nível mundial que gerou grandes preocupações relativamente às limitações das reservas energéticas, ao seu fornecimento e ao impacto ambiental. A Agência Internacional de Energia (AIE) estima que durante 1973-2011 o consumo mundial de energia primária cresceu 115% e as emissões de CO<sub>2</sub> cresceram 101%. Verifica-se também que o consumo de energia primária da Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Económico (OCDE) em 1973 representava 61,3% de toda energia mundial, enquanto que em 2011 só representava 40,5%. As emissões de CO<sub>2</sub> da OCDE em 1973 representavam 66,1% do total das emissões e em 2011 representavam somente 39,4% [1]. Isto demonstra nitidamente que apesar de haver um claro aumento do consumo energético em todos os países mundiais impulsionado pelo aumento populacional e pelo aumento da esperança média de vida, é nos países fora da OCDE, países teoricamente menos desenvolvidos, que está a surgir o maior aumento de consumo. O que isto indica é que, apesar de nos países desenvolvidos já existir uma preocupação acrescida com os consumos energéticos utilizados e do seu impacto ambiental, isso não acontece no resto dos países, pois existe uma maior preocupação no desenvolvimento económico do país do que no consumo energético utilizado. Tudo indica que esta contextualização não mudará nos próximos anos e desse modo levará a uma subida excessiva do custo da energia produzida.

No paradigma da sociedade atual, o desempenho energético dos edifícios é um dos principais objetivos da política energética nacional e internacional. Isto deve-se ao facto de o sector residencial e comercial na União Europeia (UE) representar à volta de 40% do consumo total de energia consumida e 36% das emissões totais de CO<sub>2</sub> [2].

Em 2008 a União Europeia comprometeu-se que até 2020 iria reduzir em, pelo menos, 20% as emissões de gases com efeito de estufa da UE, em relação aos níveis de 1990, reduzir em 20% o consumo de energia primária, em relação aos níveis previstos, através do investimento na eficiência energética e do mesmo modo aumentar para 20% a parte da energia proveniente de fontes renováveis no consumo da UE [3], [4]. O principal instrumento para atingir esse objetivo é a Diretiva relativa ao Desempenho Energético de Edifícios (EPBD) Reformulada [4] que para além de clarificar alguns dos princípios da anterior diretiva EPBD, veio introduzir novas disposições que reforçam o quadro de promoção do desempenho energético nos edifícios, de acordo com as metas e desafios

comuns acordados pelos Estados-Membros para os horizontes temporais de 2020 e 2050. A definição de requisitos e a avaliação de desempenho dos edifícios passa a assentar explicitamente em pilares fundamentais: comportamento térmico e eficiência dos sistemas, no caso de edifícios de habitação, acrescidos da qualidade do ar interior e da instalação, condução e manutenção de sistemas técnicos, no caso de edifícios de serviços. Para cada um destes pilares são definidos princípios gerais, concretizados depois em requisitos específicos para as situações de edifícios novos, edifícios sujeitos a intervenção e edifícios existentes.

Neste mesmo contexto surge ainda o conceito de edifício com necessidades quase nulas de energia, *nearly zero-energy building* (nZEB), o qual passará a constituir padrão mínimo para a nova construção a partir de 2020 (2018 para edifícios públicos) e uma referência para as grandes intervenções no edificado existente. Este padrão conjuga a redução do consumo de energia, na maior extensão possível e suportada numa lógica de custo-ótimo, das necessidades energéticas do edifício, com o abastecimento energético com recurso a energia de origem renovável.

Assim sendo, para lidar com as flutuações das necessidades energéticas (calor ou eletricidade), os nZEB são geralmente conectados à rede mas permitem a existência de um fluxo bidirecional. Deste modo, as casas exportam eletricidade durante o dia, quando o consumo é menor e importam durante a noite. A grande vantagem deste método é evitar os altos custos e o reduzido tempo de vida útil das baterias de armazenamento de energia elétrica. Contudo, a ausência de um sistema de armazenamento pode introduzir grandes perturbações na gestão da rede. Portanto, torna-se apelativo o estudo de formas alternativas de armazenamento energia, nomeadamente o armazenamento de energia térmica, cuja implementação e manutenção é fácil e de custos reduzidos, apresentando também um elevado tempo de vida útil.

### 1.1.1 Sistemas de AVAC

Desde do início da história da humanidade têm havido muitas tentativas para evitar o calor durante os meses quentes de Verão e captação dele durante os meses frios de Inverno. Se para evitar o frio, a tarefa tornava-se relativamente fácil, para as temperaturas quentes isso já podia tornar-se um problema. Mas desde cedo que humanidade tem conseguido encontrar maneiras de contornar esse problema, por exemplo o modo da arquitetura dos edifícios era manipulada de modo a tirar proveito da ventilação natural. Com o aparecimento da revolução industrial, estes sistemas passivos tornaram-se insuficientes para as necessidades requeridas, e assim sendo começaram a surgir os primeiros sistemas de Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado (AVAC).

O primeiro aparelho de AVAC do qual se tem registo foi inventado pelo médico americano Dr. John Gorrie de Apalachicola, Flórida. No hospital o médico colocava gelo em cestos suspensos no teto, como o ar frio era mais denso que o quente, este descia



permitindo arrefecer o ar dos quartos. Porém como se trava de uma zona quente e húmida, não era fácil nem barato obter gelo. Assim no final da década de 1830 projetou um aparelho que através da variação de pressão do ar conseguia produzir gelo. Anos mais tarde acabou por conseguir patentear a sua “máquina de fazer gelo”, sendo este o primeiro protótipo de um frigorífico que contém os princípios básicos do ciclo de refrigeração utilizado atualmente. Em 1902, Willis Carrier criou o primeiro ar condicionado onde era possível controlar tanto a temperatura como a humidade de um edifício. Este projeto tornou-se a base dos sistemas de AVAC modernos.

Atualmente, com o significativo aumento de consumo de energia dos edifícios, estratégias de poupança de energia começaram a constituir uma prioridade nas políticas energéticas de muitos países. Verificou-se que para um país pertencente à Agência Internacional de Energia, o uso energético para produzir o conforto térmico desejado pelos utilizadores com os sistemas de AVAC ultrapassava os 50% do consumo total do edifício [5]. Deste modo o desenvolvimento e implementação de técnicas eficientes de controlo para sistemas de AVAC tornou-se um fator de primordial importância.

Muitos métodos de controlo foram desenvolvidos ou propostos para sistemas de climatização. No entanto, por causa da sua simplicidade, sistemas de ligar/desligar e de controlo Proporcional-Integral-Derivativo (PID) são ainda largamente usados nos sistemas AVAC. Em prática, a regulação da temperatura interior permanece bastante básica e está centrada em controlos simples. Como resultado, existem flutuações diárias na demanda colocada pelos edifícios (tanto residenciais como comerciais) na rede elétrica. Por exemplo, no verão o pico de procura ocorre no final da manhã, quando a maioria dos sistemas de AVAC ligam para dar resposta ao aumento das temperaturas exteriores. Satisfazer essa demanda é cara e ineficiente para os produtores de energia [6].

Deste modo, a utilização de tecnologias de armazenamento de energia é a chave para permitir, aos utilizadores dos sistemas de AVAC, mudar os picos de demanda de energia, sem que seja necessário sacrificar o conforto térmico.

## 1.2 Objetivos do trabalho

É objetivo do presente trabalho de dissertação verificar a viabilidade da utilização de um armazenamento de energia térmica num sistema de AVAC, tendo sempre em conta os objetivos da diretiva relativa ao Desempenho Energético de Edifícios (EPBD), em especial a introdução do conceito de edifício com necessidades quase nulas de energia, *nearly zero-energy building* (nZEB).

Deste modo, em primeiro lugar, será necessário verificar os diferentes métodos de armazenamento de energia térmica utilizados na estrutura do edifício e verificar qual o impacto que estes podem deter no funcionamento do sistema de AVAC.

Em seguida será estudado os métodos que permitem integrar diretamente o armazenamento de energia térmica nos sistemas de AVAC.

Para que seja possível cumprir a diretiva europeia será imperativo a utilização de sistemas de energia renováveis, assim sendo será necessário verificar a influência da integração de sistemas de energia renovável nos edifícios.

No entanto estes sistemas poderão não ser suficientes para cumprir com o objetivos impostos pela diretiva. Deste modo é necessário verificar estratégias adicionais que promovam a eficiência energética de sistemas AVAC.

A metodologia aplicada neste trabalho será baseada em simulações computacionais realizadas num *software* de simulação dinâmica de edifícios.

## **1.3 Revisão bibliográfica**

### **1.3.1 Armazenamento de energia térmica na envolvente do edifício – Inercia Térmica**

A inercia térmica representa a capacidade de contrariar as variações de temperatura no interior de um edifício devido à sua capacidade de acumular calor nos seus elementos de construção. A velocidade de absorção e a quantidade de calor absorvida determina a inércia térmica dum edifício. A inércia térmica influencia 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.

Assim, quanto maior for a inercia térmica de um edifício, maior será a facilidade dos sistemas térmicos responderem às solicitações exigidas 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 climatéricas.

Deste modo, as estratégias para otimizar a inercia térmica de um edifício têm-se revelado de uma importância especial pois pode minimizar a necessidade de energia requerida para realizar o aquecimento e arrefecimento, e deste modo, reduzir a utilização dos sistemas de climatização ou mesmo eliminá-los.

Existem várias soluções construtivas que permitem manipular a inercia térmica de um edifício de forma a tirar melhores resultados energéticos no que toca à sua climatização. Em seguida irão ser estudados os mais promissores:

- ***Thermally Activated Building System (TABS)***

TABS é um sistema hidrónico que é constituído por tubos embutidos na laje de betão dos elementos de construção. Principalmente por causa do baixo custo de investimento e conforto favorável, o uso de TABS para o aquecimento e arrefecimento de edifícios têm-se espalhado nos últimos anos por toda a Europa do Norte e Central. Com TABS, as grandes capacidades térmicas da estrutura do edifício, como pisos maciços e tetos, são utilizados como armazenamento térmico de energia (*thermal energy storage*) e é deste modo integrado na estratégia global de energia do edifício. Ao absorver energia radiante e convectiva de ganhos de calor ou pela libertação de energia armazenada, as lajes fornecem arrefecimento ou aquecimento ao edifício. Em contraste com o arrefecimento radiante por painéis para tetos falsos, este sistema explora o comportamento térmico dinâmico dos elementos das paredes. Através do armazenamento intermediário de energia nas lajes, os picos de demanda de energia são achatadas. Além disso, as grandes áreas de superfícies termo-ativas permitem fluxos de calor substanciais entre o espaço climatizado e a estrutura, mesmo para diferenças relativamente baixa temperatura. Por estas razões TABS são predestinados para o uso em aplicações de baixa temperatura de aquecimento e alta temperatura de arrefecimento. No entanto, as TABS são caracterizadas pela sua resposta lenta, o que torna a aplicação do controlo tradicional problemática. *Model predictive control* (MPC) é uma técnica de controlo avançado que é adequado especialmente para sistemas de resposta lenta, como TABS. Ao tomar ações preventivas em vez de medidas corretivas, MPC tem o potencial de melhorar o desempenho da TABS em termos de conforto e consumo de energia.

Em [7] é estudado um caso de um edifício com TABS controlado por um MPC que tem como objetivo maximizar o conforto térmico, minimizado o consumo energético. Com base nisso, foi realizado uma análise de sensibilidade para verificar o efeito das variáveis de controlo (otimização e controlo de horizonte) no desempenho do MPC em situações com diferentes tempos de resposta das TABS (condicionado pela espessura da camada de betão) e temperaturas exteriores. Em [8] é descrito um método que permite o controlo automatizado de uma TABS pelo funcionamento intermitente do sistema utilizando um controlo de modulação de *pulse width modulation* (PWM) para realizar o controlo de temperatura de um espaço climatizado. É mostrado que o *free cooling* com uma torre de arrefecimento é o sistema mais eficaz se a fonte fria é o ar exterior.

No relatório final do projeto *Opticontrol* [9] é demonstrado o resultado do estudo exaustivo dos últimos anos (onde se enquadra o estudo [8]) no que diz respeito ao uso de TABS em conjugação com controlos de *rule-based control* (RBC) e MPC. Nele também é realizado o controlo das persianas e da iluminação, o que influencia as necessidades de arrefecimento e aquecimento da TABS.

- ***Phase-change material (PCM) na envolvente***

Materiais de mudança de fase (*Phase-change materials* (PCMs)) são substâncias com elevado calor de fusão que fundem e solidificam a uma certa faixa de temperatura, sendo capazes de armazenar e libertar grandes quantidades de energia. Em PCMs, a energia é absorvida ou libertada quando o material muda de sólido para líquido e vice-versa [10].

Como já visto com TABS, o armazenamento de calor é uma técnica muito interessante para diminuir o consumo de energia nos edifícios e reduzir o custo de operação dos edifícios. Portanto, durante as últimas décadas têm sido desenvolvidos uma variedade de soluções de armazenamento de calor para o mercado da construção. Algumas das vantagens de armazenamento de calor nos edifícios são os seguintes: redução de potência de pico para aquecimento e arrefecimento, a possibilidade de mudar as cargas de pico de aquecimento e arrefecimento para as horas de tarifas baixas, deslocação dos picos de temperatura para horas de não-trabalho, melhoria do ambiente interior e utilização eficiente das cargas passivas para o aquecimento e arrefecimento [11].

É importante mencionar que cada sistema de armazenamento de energia latente, tal como os PCMs, também tem a sua parte de armazenamento de energia sensível. Porém esta é muito reduzida comparadamente à capacidade de energia latente, o que torna deste modo mais interessante o estudo do armazenamento de energia latente.

Por exemplo, materiais de construção comuns, tais como betão e gesso representam apenas a capacidade de armazenamento de calor sensível, que varia aproximadamente entre 0,75 e 1 kJ/(kg.K), enquanto que, por exemplo, alguns materiais de parafina média que se submetem a mudança de fase têm uma capacidade armazenamento de calor latente de aproximadamente 110 kJ/(kg.K). Como a capacidade térmica mássica é muito superior, o volume de material necessário para armazenar a mesma quantidade de energia é significativamente menor. Outra vantagem dos PCMs é o facto de que quando ocorre a mudança de fase a temperatura do material se manter praticamente constante. Graças a esta característica, a estratificação de temperatura nos espaços é minimizada e é evitado que as superfícies das construções atinjam temperaturas elevadas [11].

Apesar de alguns destes produtos estar implementados nos edifícios, não existe registo de um caso de estudo real do desempenho dos PCMs em edifícios, sendo a única informação disponível limitada aos pequenos testes de laboratório.

Em [12] foi proposto um sistema onde a parede foi reforçada com PCM. O objetivo do estudo foi avaliar o efeito do padrão de ocupação e ventilação no potencial de poupança energética do sistema. Verificou-se que o padrão de ocupação influencia o valor ideal do ponto de fusão do PCM para o qual o valor máximo de poupança de energia é alcançado e verificou-se que a ventilação reduz a poupança de energia alcançada.

O uso de energia elétrica em “*off-peak*” para fazer o aquecimento dos edifícios através do armazenamento calor latente no pavimento é estudado em [13]. A análise numérica e experimental do potencial desempenho indica que o sistema poderá ser promissor, desde que a temperatura de mudança de fase e espessuras do ar sob o piso seja escolhido adequadamente.

Apesar das pesquisas sobre PCM integrados nas construções opacas serem bastantes comuns, resultando em vários desenvolvimentos de novos produtos, são poucos os estudos que se preocupam com os materiais transparentes (Ex: Janelas) ou componentes de sombreamento (Ex: Persianas).

Pela perspectiva energética e térmica, os envidraçados representam o elo mais fraco entre as condições internas e externas de um edifício. Nos casos de climas frios as janelas são responsáveis por perdas de calor muito acentuadas do interior para o exterior. Pelo contrário, em climas quentes o calor excessivo que entra pelos envidraçados causa um aumento da energia necessário para realizar o arrefecimento. Apesar disso, os arquitetos e construtores mantém o mesmo nível de rácio entre os envidraçados e a componente opaca. Porém devido às novas legislações que restringem o uso de energia nos edifícios, este aspeto terá de ser mudado. Deste modo, para manter este rácio é necessário proceder à modificação das propriedades térmicas e óticas destas matérias, conseguindo assim responder melhor às condições climatéricas exteriores [11].

Uma comparação numérica entre a eficiência térmica de duas Janelas de vidro em que uma era preenchida com gás absorvente e a outra com PCMs é apresentado em [14]. As janelas investigadas foram expostas à radiação solar num clima quente (Brasil). Os resultados indicaram que o PCM filtra a radiação térmica e pelo processo de mudança de fase reduz a quantidade de penetração de calor até que este esteja completamente derretido.

Em [15] foi realizado o estudo numérico paramétrico sobre o uso de PCM em persianas para reduzir o ganho de calor solar. A persiana de referência era feita de uma espuma com preenchimento de alumínio. Os resultados indicaram que a magnitude da temperatura de fusão do PCM e a sua quantidade na persiana, tem um efeito significativo no desempenho térmico na persiana de PCM. O ponto de fusão do PCM na persiana devia ser perto do limite superior da temperatura da janela durante o dia. O PCM devia ser impedido de derreter completamente durante as horas de funcionamento e sua quantidade devia ser suficiente para absorver a maioria de calor durante o dia. Resultados numéricos indicaram que 23% do calor ganho pelas janelas podia ser reduzido com 3 cm de espessura da persiana de PCM comparadamente aos 6 cm necessários na persiana feita de espuma e alumínio.

### **1.3.2 Armazenamento de energia térmica em sistemas de AVAC**

O armazenamento de energia térmica, *thermal energy storage* (TES), é definido pela variação da energia interna de um material em formato de calor sensível, calor latente e termoquímica ou uma combinação destes. Integrar sistemas TES com sistemas de AVAC pode fornecer maior poder de refrigeração e aquecimento aos edifícios além disso pode mudar a demanda elétrica de pico para períodos fora de pico. Quando conjugados com sistemas de energia renováveis, o sistema TES pode aumentar a eficiência destes, pois pode armazenar a energia excedente que é produzida em certas alturas do dia para que se

possa utilizar quando necessário. Sistemas de TES podem ser classificados como TES para aquecimento ou para arrefecimento.

No armazenamento de calor sensível, *sensible heat storage* (SHS), a energia térmica é armazenada através do aumento da temperatura de um sólido ou líquido, ou seja, o sistema de SHS depende da capacidade térmica e da alteração na temperatura do material para realizar o processo de carga e descarga. A quantidade de calor que um sistema pode armazenar depende do calor específico do fluido/sólido, alteração da temperatura e da quantidade de material dentro do *storage*. Devido a esse facto, este tipo de sistema, apesar de ser bastante simples e ter uma tecnologia bem desenvolvida, representa o método menos eficiente para armazenamento de energia.

Os materiais de um sistema SHS podem ser divididos em dois grupos principais: meios de armazenamento sólidos e líquidos. Os líquidos são na sua maioria água e óleo térmico. Os sólidos podem ser rochas, tijolos, betão, ferro, terra, entre outros [16].

A água parece ser o melhor líquido para SHS pois é barato e tem um elevado calor específico. No entanto para temperaturas superiores a 100°C são usados óleos térmicos, sais fundidos ou metais líquidos [17].

Sistemas de SHS podem também diferenciar-se no local onde é armazenada a energia. Estes podem ser realizados em tanques de água, aquíferos ou em *rock beds*.

Já foi mencionando anteriormente o estudo [18] que representa um bom exemplo de um sistema de SHS. Nele, um edifício equipado com tanques de água é usado para armazenar água fria durante a noite com apoio de um chiller. Foi concebido um controlador preditivo (MPC) para otimizar o funcionamento dos chillers de modo a armazenar a quantidade ótima de energia térmica no tanque.

Em [19], o objetivo geral do sistema foi a utilização de águas subterrâneas de um aquífero para arrefecer o condensador do sistema de climatização e ao mesmo tempo armazenar este calor residual num aquífero independente. No Verão, o arrefecimento foi realizado com água subterrânea em torno de 18 °C em vez de utilizar o ar exterior a 30-35 °C. Este facto diminui o consumo de energia elétrica de forma significativa. Além disso, foi possível utilizar o calor armazenado quando necessário no inverno. Os resultados indicaram que durante a estação de arrefecimento com o sistema aquífero foi possível poupar 60% da energia elétrica comparadamente a um sistema convencional.

O armazenamento de calor latente, *latent heat storage* (LHS), baseia-se na absorção ou libertação de calor quando um material de armazenamento é submetido a uma mudança de fase de líquido para sólido ou vice-versa. Este tipo de armazenamento já foi referido no subcapítulo anterior, pois o LHS é realizado pelos PCMs, ou seja, oferece vantagens tais como uma alta capacidade de armazenamento de calor, unidade de tamanhos mais reduzidos e comportamento isotérmica durante a carga e descarga de processos. Estes fatores tornam os sistemas LHS mais atrativos que os SHS.

No entanto, há um número de desvantagens associadas aos materiais dos LHS. Baixa condutibilidade térmica, estabilidade do material ao longo de vários ciclos, a segregação de fase, o subarrefecimento e o custo são algumas dessas limitações [16].

Em [20] foi desenvolvido um piso radiante com uma camada integrada de PCM granulado onde o objetivo era travar os ganhos internos a uma temperatura constante durante o arrefecimento no verão sem afetar a sua capacidade de aquecimento no inverno. Foi demonstrado que era possível reduzir aproximadamente 25% da água utilizada para realizar o arrefecimento sem que este afetasse o comportamento do piso radiante durante a estação de aquecimento.

Em [21] foi desenvolvido um sistema LHS que consistia na colocação de capsulas de PCM na conduta de ar de modo a poder realizar ventilação noturna. Ou seja, durante a noite, a corrente de ar frio arrefecia o PCM, eliminando toda a carga térmica acumulada durante o dia. Em período diurno outra corrente de ar fluía através do sistema LHS, perdia energia e era insuflado para dentro do edifício com temperaturas mais baixa.

Em [22] foi descrito uma abordagem para a formulação de um algoritmo de controlo preditivo (MPC) para realizar o arrefecimento de um edifício numa situação onde o preço da energia elétrica variava conforme a hora em que é utilizada. O sistema mecânico era constituído por chillers e um banco de gelo que era usado para o armazenamento de energia térmica. O arrefecimento do espaço interior podia ser feito quer pela utilização direta dos chillers, quer pela utilização do banco de gelo quando os preços da eletricidade eram elevados. O banco de gelo era carregado durante a noite pelos chillers enquanto o preço da eletricidade era baixo. Os resultados indicaram que era possível diminuir significativamente o custos associados ao arrefecimento do edifício.

No armazenamento de calor termoquímico, *thermochemical heat storage* (THS), a energia é libertada ou absorvida através da quebra e reformulação das ligações moleculares numa reação química completamente reversível. Neste caso, o calor armazenado depende da quantidade de material de armazenamento, o calor endotérmico da reação, e a extensão da conversão. O armazenamento de energia com base em reações químicas é particularmente vantajoso comparadamente aos outros sistemas. As principais vantagens são:

- Os componentes gerados na reação química podem geralmente ser armazenados em separado, à temperatura ambiente, após arrefecimento para condições ambientais subsequentes à sua formação. Portanto, há pouca ou nenhuma perda de calor durante o período de armazenagem e como consequência, o isolamento não é necessária.
- Adequado para aplicações de armazenamento de longo prazo, por exemplo, armazenagem sazonal de calor solar, pois como já foi dito, trata-se de um processo quase sem perdas de energia durante o período de armazenamento.
- Materiais termoquímicos têm uma densidade de armazenamento mais elevada do que os outros tipos de TES, permitindo assim obter sistemas mais compactos

comparadamente aos sistemas de SHS e LHS. Este fator é particularmente vantajoso quando o espaço para a colocação de uma TES é limitado. [23]

Porém sistemas THS ainda estão num estágio muito inicial de desenvolvimento. A maioria dos estudos são feitos em escala de laboratório. Deste modo é necessário uma quantidade considerável de tempo, dinheiro e esforços para que estes sistemas se tornem comercialmente viáveis.

Em [24] foi estudado um armazenamento de calor a longo prazo através de um sistema de sorção fechado com NaOH e água, e compararam os resultados com um sistema de armazenamento convencional, onde o foco é colocado no volume do sistema.

Em [22], foi investigado a integração de um processo de sorção com base na utilização de brometo de estrôncio como reagente e água como o fluido refrigerante. Quando combinado com painéis solares térmicos e um piso radiante, tornou-se possível ao sistema obter tanto uma função de Aquecimento (para o inverno) como de Arrefecimento (para o verão).

As vantagens e desvantagens dos três conceitos possíveis para o armazenamento de energia térmica estão listadas na Tabela 1.



**Tabela 1 - Características dos diferentes tipos de TES**

Parâmetros	Tipos de TES		
	Sensível	Latente	Termoquímica
Densidade de armazenamento	Baixa	Média	Alta
Temperatura de funcionamento	Variável	Constante	Variável
Isolamento	Necessário	Necessário	Não necessário
Perdas de energia (longo termo)	Grandes	Médias	Baixas
Tempo de vida	Longo	Limitado (devido à estabilidade do material ao longo de vários ciclos)	Elevado (porém depende da degradação dos reagentes)
Estado da tecnologia	Disponível Comercialmente	Disponível Comercialmente para alguns materiais e temperaturas	Ainda não está disponível (estão a ser feitas várias pesquisas havendo já alguns testes piloto)
Transportabilidade	Pequenas distâncias	Pequenas distâncias	Grandes distâncias
Outras características	Custo reduzido, simples de ser aplicado	Baixa condutividade térmica	Tecnologia complexa, Custos elevados

### 1.3.3 Integração de energias renováveis nos edifícios

Para um edifício se tornar nZEB é imperativo que este tenha uma componente de energia renovável na sua estrutura. Deste modo existe um grande potencial em utilizar a energia solar, eólica, geotérmica e energia da biomassa nos edifícios pois são uma tecnologia que está relativamente madura.

- **Energia Solar**

A utilização da energia solar é a que tem recebido mais atenção em todo o mundo pois é uma fonte inesgotável sem emissões de gases de efeito estufa, fácil de implementar e pode ser utilizado em sistemas fotovoltaicos, solares térmicos para aquecimento de água e

sistemas solares híbridos (contém as duas componentes) [25]. Outra das vantagens dos painéis solares que tem sido largamente explorada é a possibilidade destes poderem ser integrados na envolvente do edifício (BIPV) comparadamente aos BAPV.

Um sistema *building integrated photovoltaics* (BIPV) consiste em integrar os módulos fotovoltaicos na envolvente do edifício, como o telhado ou a fachada. Ao servir em simultâneo como material de construção da envolvente e gerador de energia, o sistema BIPV pode proporcionar poupança tanto em termos de materiais usados como em custos de eletricidade, o que permite reduzir o uso de combustíveis fósseis e de emissões de gases que destroem a camada de ozono e mesmo assim tornar o edifício interessante em termos arquitetónicos.

Por outro lado um sistema *building attached photovoltaics* (BAPV) consiste na colocação de módulos fotovoltaicos sobre a envolvente após o edifício estar completamente construído. Não estando assim diretamente integrado na sua envolvente. Este é o caso mais usual dos edifícios.

A vantagem de sistemas integrados em relação aos sistemas mais comuns, não-integrados, é que o aumento do custo inicial de integração pode ser compensado através de uma redução dos materiais de construção e dos custos de mão-de-obra normalmente utilizados na construção do sistema não-integrado.



**Figura 1 - Exemplo de BIPV e BAPV**

Em Portugal existe um bom exemplo de um sistema BIPV, trata-se do Edifício solar XXI do Laboratório Nacional de Energia e Geologia (LNEG). O edifício contempla módulos fotovoltaicos que produzem energia elétrica e que através da utilização de paredes de Trombe também é possível aproveitar calor que é utilizado para aquecer ou ventilar o espaço interior. É possível verificar o seu funcionamento na Figura 2.

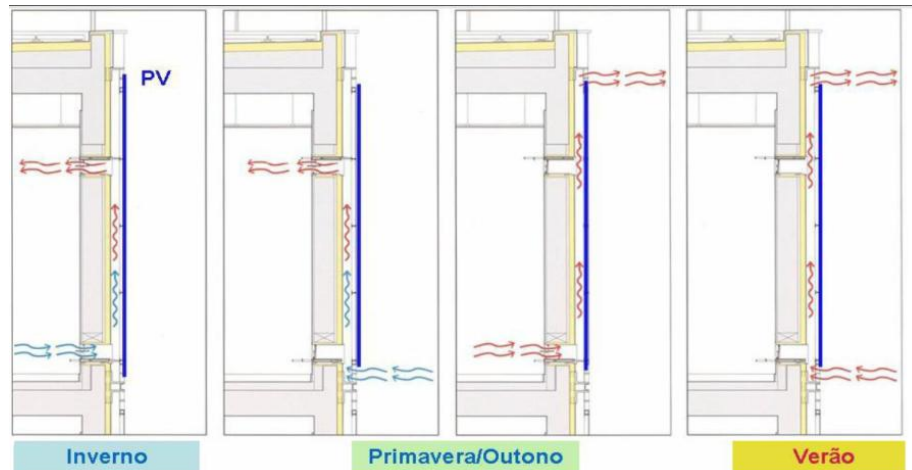


Figura 2 - Esquema de funcionamento do sistema fotovoltaico com aproveitamento térmico passivo indireto [26]

As paredes de Trombe não só permitem utilizar o calor gerado na parte de trás dos painéis fotovoltaicos para aquecer o cavidade de ar entre o painel e a parede para que depois este seja utilizado para aquecer o interior do edifício como também permite diminuir a temperatura dos painéis, o que é benéfico, pois ao contrário de painéis solares térmicos os painéis fotovoltaicos perdem produtividade quando aquecem em demasia. Por exemplo, em [27] foi explorado a melhor forma de travar o aumento acentuado da temperatura dos painéis fotovoltaicos. Deste modo o espaço entre o painel e parede interior que normalmente era preenchido por uma placa de alumínio, foi substituído por uma placa de PCM. Os resultados indicaram que durante a mudança de fase (do PCM) era possível reduzir a temperatura em mais de 30°C quando comparado com a parede com a placa de alumínio.

Em [28] foram estudadas duas paredes de Trombe, as duas eram idênticas porém numa delas foi introduzido uma camada de PCM entre a cavidade de ar e a parede interior. Os resultados apresentados mostraram que no sistema com PCM a temperatura do ar no interior da cavidade diminuía e tornava o sistema mais estável pois parte da energia era armazenada como o calor latente no PCM da parede.

- **Energia Eólica**

A integração da energia eólica nos edifícios pode dar-se através dos sistemas de micro e mini-eólica, com potências que variam comercialmente entre o 1kW e os 50 kW e que se encontram em contínuo desenvolvimento.

A aplicação urbana em massa destes equipamentos encontra alguns desafios, nomeadamente os padrões irregulares de vento característicos do ambiente urbano bem como os elevados custos de manutenção.

Deste modo, os sistemas eólicos são geralmente utilizados na produção de energia em arranha-céus [29], porém em [30] é possível verificar um artigo onde é estudado a implementação de pequenos geradores eólicos em edifícios residenciais.

- **Energia Geotérmica**

A energia geotérmica é outra grande fonte de energia limpa que está armazenada no interior da terra. A utilização de bombas de calor geotérmicas em edifícios tem demonstrado um enorme potencial e deste modo tem sido o foco da maioria dos estudos [31]. Esta tecnologia tira proveito do facto de a terra estar a uma temperatura relativamente constante ao longo de todo o ano (e assim não estar ao merecer dos picos de temperatura do ar exterior), para tornar o processo de climatização mais eficiente.

- **Energia da Biomassa**

Atualmente, a biomassa disponível pode ser constituída por palha, lenha, estrume animal, resíduos orgânicos industriais e resíduos sólidos urbanos. Eles podem ser utilizados para o aquecimento através da combustão direta ou conversão química. Por exemplo, pode ser gerado biogás a partir de estrume animal através da conversão bioquímica [32].

A utilização de fontes de energia renováveis para criar edifícios sustentáveis parece ser uma solução promissora, porém o grande problema associado às fontes de energia renováveis mais promissoras (solar e eólica), está relacionado com a sua natureza intermitente. Por exemplo, um painel solar é incapaz de funcionar à noite e uma turbina eólica, só produz energia quando o vento é suficientemente forte. Deste modo a integração de sistemas TES em sistemas de energia renováveis torna-se interessante, pois podem desempenhar um papel importante no tratamento de cargas de pico e resolver a intermitência, tornando o sistema mais eficiente [22].

### **1.3.4 Estratégias para a promoção da eficiência energética de sistemas de AVAC**

Os sistemas de AVAC representam uma elevada percentagem do consumo total dos edifícios, desta forma torna-se imperativo verificar estratégias que possam diminuir o seu consumo. Assim sendo, podem ser utilizadas estratégias que aumentem a eficiência dos sistemas ou como verificado com o armazenamento de energia térmica, estratégias que permitem reduzir as necessidades de climatização. Como já foi mencionado no

enquadramento, os sistemas AVAC ainda possuem controlos bastantes simplistas que permitem uma aplicação generalizada, mas que pode não ser os mais eficientes. Durante a revisão bibliográfica, foi verificado que algumas implementações necessitam um controlo avançado para que seja possível retirar todo o potencial da sua instalação. Um bom exemplo disso é o uso do controlo preditivo no sistema TABS.

Assim sendo, será necessário estudar os diferentes métodos de controlo de sistemas AVAC, de modo a verificar qual as vantagens e desvantagens de cada controlo e a sua aplicabilidade em casos reais.

Uma componente ignorada até o momento e que pode ser enquadrada neste tópico é a utilização de sombreamento nos edifícios. Este possui um papel importante no consumo energético dos edifícios, sendo interessante verificar a existência de métodos de controlo do sombreamento que permitem reduzir as necessidades de climatização dos edifícios.

#### **1.3.4.1 Métodos de controlo de sistemas de AVAC**

Para que se tenha uma perspectiva global da realidade atual dos métodos de controlo é necessário proceder à sua classificação. Deste modo os métodos de controlo são então divididos em controlo clássico, controlo *hard*, controlo *soft*, controlo híbrido, e outras técnicas de controlo. Na figura seguinte é possível verificar a classificação de cada método de controlo.

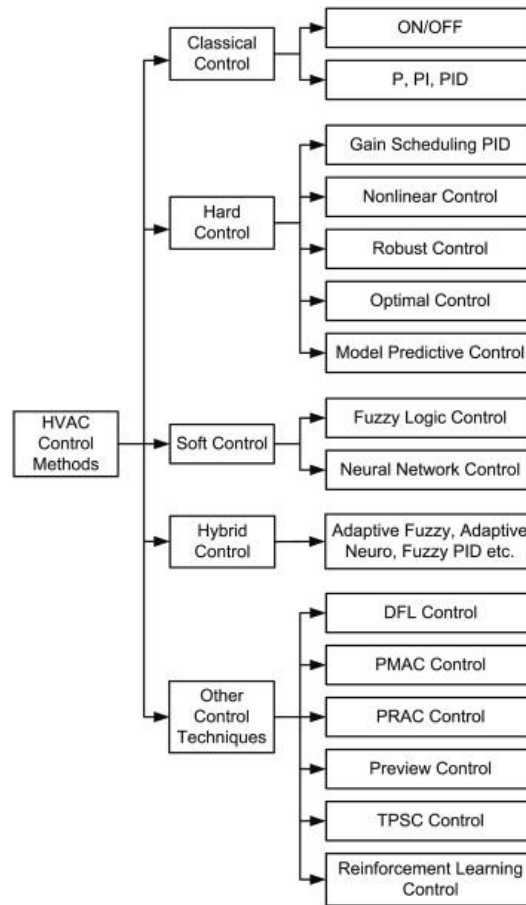


Figura 3- Classificação dos métodos de controlo para sistemas de climatização [33]

- **Controlo Clássico**

Controladores clássicos consistem nas técnicas de controlo mais frequentemente utilizadas, tais como controlo de ligar/desligar, P, PI, PID. O controlador de ligar/desligar utiliza um limite superior e inferior para regular o processo dentro dos limites indicados. Os controladores P, PI e PID usam o erro dinâmico e modulam a variável controlada para conseguir o controlo preciso do processo.

Controladores clássicos são utilizados para o controlo dinâmico de serpentinas de arrefecimento [34], controlo de temperatura ambiente [35], controlo de taxa de abertura do *dampers* [36], controlo de pressão de ar de insuflação e controlo do sistema de aquecimento [37]. A maioria das pesquisas está focada na busca de métodos de *optimal tuning* e de *auto-tuning* para controladores PID.

Apesar do controlador ligar/desligar ser o mais intuitivo e o de mais fácil de implementação, este não é capaz de controlar os processos com atrasos no tempo (*time delay*). Devido à elevada inércia térmica de muitos processos de climatização, um processo que é controlado por um controlador ligar/desligar exibe grandes oscilações dos *set points*. O controlador PID produz resultados promissores, mas o ajuste dos parâmetros do

controlador é pesado e o desempenho do controlador degrada se as condições de funcionamento variarem das condições de ajuste. Abordagens *re-tuning* ou *auto-tuning* para o controlador PID [38] podem ser demoradas. Em certas aplicações, *auto-tuning* pode ser inaceitável por causa de sua natureza intrusiva em relação à operação normal de funcionamento [39].

- **Controlo *Hard***

Controladores rígidos são sistemas compostos por controlos *gain scheduling*, controlos não-lineares, controlos robustos, controlos ótimos, e MPC.

No controlo *gain scheduling*, um sistema não linear é dividido em regiões lineares por partes. Para cada uma das regiões lineares, um PI linear ou controlador PID é projetado com um conjunto diferente de ganhos. *Self-tuning* PI ou PID também são propostos na literatura para variar o ganho do controlador com base no estado do processo. Por exemplo, em [40], dois controladores PI são ajustados para atender às condições de demanda alta e baixa de calor num sistema hidrónico.

Para o projeto do controlador não-linear, a lei de controlo pode ser obtido usando a teoria de estabilidade de Lyapunov, linearização por realimentação e técnicas de controlo adaptativo. A lei de controlo é usada para conduzir o sistema não linear a um estado estável enquanto se atinge os objetivos de controlo. Controladores não-lineares têm sido aplicados nas unidades de tratamento de ar (UTA's) [41], permutadores de calor ar-água [42], e no controlo de estufas [43].

O objetivo do controlo robusto é projetar um controlador que funciona bem sob perturbações que variam no tempo e mudanças de parâmetros. Exemplos de controlos robustos são o controlo de temperatura nas condutas de fornecimento de ar [44], controlo do fluxo de ar [44], e controlo de temperatura por zonas [45].

O algoritmo do controlo ótimo resolve um problema de otimização para minimizar uma determinada função de custo. Os objetivos da otimização do sistema de AVAC são usualmente a minimização do consumo de energia e minimização do esforço necessário para maximizar o conforto térmico. Controlos ótimos têm sido aplicados em armazenamentos térmicos ativos (*active thermal storage*) [46], armazenamentos térmicos passivos (*passive thermal storage*) [47], otimização de sistemas de AVAC [48], sistemas de volume de ar variável (VAV) [49] e em aquecimento e arrefecimento de edifícios [50].

As técnicas de controlo hard estão bem estabelecidas em termos de *design* dos sistemas de controlo. As técnicas de controlo não-lineares são eficazes, mas exigem a identificação de estados estáveis e análise matemática complexa para o projeto do controlador. Para o controlo *gain scheduling* é necessário realizar a identificação das regiões lineares e garantir a lógica do controlador entre regiões. O ajuste manual de múltiplos controladores PID nessas regiões pode também ser bastante complicado. O Controlo ótimo e controlo robusto são técnicas promissoras para sistemas de AVAC porque eles são capazes de rejeitar distúrbios e parâmetros variáveis no tempo. Em geral, a robustez é difícil garantir em

sistemas de climatização que estejam sujeitos a condições variáveis nos edifícios. Muitos destes métodos requerem também a especificação de parâmetros adicionais, o que pode ser difícil e pouco prático para integração em sistemas de AVAC. Entre as abordagens de controlos rígidos, MPC é uma das técnicas mais promissoras devido à sua capacidade para integrar rejeição de distúrbios, manipulação das restrições, sistemas dinâmicos lentos e estratégias de conservação de energia na formulação de controlador.

- **Controlo *Soft***

Em termos de Técnicas de controlo *soft* é possível verificar controlos baseados na Lógica *Fuzzy* (LF) e em Redes Neurais Artificiais (RNAs). Estes representam bons exemplos de novas técnicas que só são possíveis devido ao surgimento de controlos digitais.

Num controlador com LF, as ações de controlo são implementadas na forma de declarações *if-then-else*. A LF também pode ser incorporada para o *auto-tuning* dos ganhos do controlador PID em que o controlo PID representa a extensão local do controlo e o supervisor da LF é muitas vezes usado para otimizar a resposta do sistema à escala global. O supervisor da LF também atua como um árbitro e resolve objetivos conflitantes dos controladores no nível local, priorizando determinados controladores sobre os outros com base nos objetivos comuns de redução no consumo de energia e manutenção de conforto térmico. Um exemplo do sistema baseado na LF é o do controlo que utiliza o *predicted mean vote* (PMV) para realizar o controlo a temperatura, humidade e velocidade do ar de uma UTA [51].

As RNAs são técnicas computacionais que apresentam um modelo matemático inspirado na estrutura neural de organismos inteligentes e que adquirem conhecimento através da experiência. O algoritmo matemático é então utilizado como se tratasse de uma caixa preta pois não requer uma compreensão do processo físico subjacente. A RNA é usualmente usado em controlos *feed-forward* e também pode ser usado nas entradas e saídas de um controlador de forma a poder substituir um controlador convencional. Exemplos de sistemas de RNA incluem, um controlador baseado num *predicted mean vote* (PMV) que pretende garantir o conforto térmico de um dado espaço interior através do controlo de temperatura [52] e um controlador que faz o controlo do ventilador de ar de um chiller [53].

A implementação do controlo LF requer um conhecimento abrangente da operação do sistema e seus diferentes estados, enquanto o controlo baseado num sistema RNA requer dados numa ampla gama de condições de funcionamento, que pode não estar disponível para muitos sistemas. Além disso, a indústria é geralmente relutante em adotar e usar uma abordagem de caixa preta.



- **Controlos híbridos**

Controladores híbridos são produzidos pela junção de técnicas de controlo Hard e Soft. Vários controladores, incluindo o controlo *quasi-adaptive fuzzy*, controlo *adaptive-neuro* e controlo fuzzy-PID, têm sido propostos na literatura para o controlo de sistemas de climatização. As técnicas de controlo hard e soft complementam-se, podendo a combinação dos dois resolver problemas que não podem ser resolvidos por cada técnica separadamente. Um exemplo de um controlador híbrido é o uso do controlador *quasi-adaptive fuzzy* para a regulação de temperatura numa sala [54].

Como os controlos híbridos beneficiam das qualidades de ambas as técnicas de controlo (*hard* e *soft*), estes também herdam os problemas associadas a essas técnicas. Por exemplo, a componente do controlo soft requer experiência do utilizador e grandes quantidades de dados para o treinamento, a componente de controlo hard pode ser difícil de projetar e ajustar devido à ampla gama de condições de funcionamento muitas vezes observadas em sistemas de climatização.

- **Outras técnicas de controlo**

Outras técnicas como o controlo *direct feedback linear* (DFL) [55], *pulse modulation adaptive controller* (PMAC) [56], *pattern recognition adaptive controller* (PRAC) [57], *preview control* [58], *two parameter switching control* (TPSC) [59] e *reinforcement learning control* [60] também têm sido propostos para o controlo de sistemas de AVAC.

### 1.3.4.2 Sombreamento

As áreas envidraçadas e os dispositivos de sombreamento possuem um papel importante no consumo energético dos edifícios. Fachadas altamente envidraçadas têm sido crescentemente utilizado em novos edifícios, permitindo assim maior acesso à luz natural e também vista para o exterior. Deste modo, existem várias razões distintas para querer controlar a quantidade de luz solar que é admitida num edifício. Por exemplo, em climas quentes e ensolarados, excesso de ganhos solar pode resultar em consumos altos de energia de arrefecimento. Porém, em climas frios e temperados, a entrada de sol de inverno nas janelas podem contribuir positivamente para o aquecimento solar passivo (quando orientadas para este, oeste e sul).

Os diversos sistemas de sombreamento são classificados em função da sua respetiva localização no edificado, exterior ou interior e ainda subdivididos em função da possibilidade de manuseamento, fixos ou móveis.

O sombreamento pelo interior pode ser menos eficaz porque quando os raios solares intercetam o vidro estes alteram o seu comprimento de onda e já não conseguem voltar a

sair, ficando retidos no espaço interior aquecendo-o (efeito de estufa), enquanto no sombreamento exterior, os raios solares ao interceptarem os elementos, dispersam antes de atingirem o vidro, podendo chegar a reduzir significativamente os ganhos de calor.

Um sistema exterior por vezes permite ainda a circulação do ar quando cumpre a sua função de sombrear, ajudando ainda mais no arrefecimento. Os sistemas exteriores são mais dispendiosos na instalação e manutenção em relação aos sistemas interiores, mas a longo prazo podem reduzir os custos a nível do consumo energético.

Palas horizontais ou verticais, galerias, arcadas, paredes reticuladas, são um exemplo de elementos fixos para o sombreamento. A principal desvantagem destes sistemas fixos é que apenas proporcionam um adequado sombreamento numa certa parte do dia e em certas estações, além de poderem estar a limitar a entrada de luz em outras alturas do ano, quando a luz natural seria desejada.

Um sistema de sombreamento fixo faz parte integrante do exterior do edificado e por isso deve ser tomado em consideração algumas atenções como a altura/comprimento e profundidade do elemento afixado e/ou a sua exata fixação em relação às dimensões do vão de modo a obter o máximo de benefícios dos raios solares no Inverno, deixando que os raios passem pelo vão, ou então na estação de arrefecimento intersectá-los. Uma fachada a sul tira especial partido de um sistema de sombreamento horizontal fixo, uma fachada a este e a oeste tiram mais vantagens de um sombreamento lateral fixo, pois a posição do sol é mais baixa.

A eficiência de um sistema fixo varia consoante as variações das estações e a posição do sol e por isso os sistemas móveis podem ser mais adequados por evitarem alguns problemas nesse sentido. Estes são controlados manual ou automaticamente, podendo se adequarem à vontade individual e às condições térmicas confortáveis para o ocupante ao mesmo tempo que podem proporcionar ao longo de todo o ano, bons níveis de iluminação, desde que sejam aplicados e geridos corretamente. As portadas, os toldos retrácteis, estores de lâminas ajustáveis, as cortinas, telas de rolo, as venezianas são alguns exemplos de sistemas, que podem estar abertos grande parte do tempo, sendo fechados apenas com a inclinação dos raios solar o exigir. Alguns destes sistemas podem ser ainda usados para aumentar o efeito de isolamento térmico na estação de aquecimento [61].

Em [62] foi realizada uma pesquisa que pretendia alcançar conforto visual e poupanças de energia num prédio de escritórios por meio de controlo ambiental visual, focando-se num critério quantitativo (iluminância) e num critério qualitativo (índice de encandeamto) da iluminação natural. Foram usadas 10 estratégias de controlo para iluminação e sombreamento onde verificaram que o *design* adequado da fachada e estratégias de controlo dos dispositivos de sombreamento e/ou de iluminação, podem reduzir não só no consumo de energia elétrica da iluminação como também o uso de energia nos sistemas de HVAC.

Em [9] foi realizado o controlo das persianas de um edifício de serviços através de um algoritmo, *Rule-Based Control* (RBC), que continha uma componente preditiva. Os investigadores concluíram que seria possível reduzir cerca de 5-10% de energia primária

não renovável e custo monetário em aquecimento, arrefecimento e iluminação comparadamente às persianas não controladas, mantendo no entanto o conforto térmico.

### 1.3.5 Simulação dinâmica de edifícios

Para se poder visualizar o desempenho energético de um edifício virtual será necessário recorrer a um programa que permita realizar simulação dinâmica de edifícios. Existe uma grande variedade de *softwares* que permite realizar esta análise, contudo, os modelos que se destacam devido à sua versatilidade e fiabilidade são: TRNSYS, ESP-r, DOE-2 e EnergyPlus. Sendo estes acreditados pela norma ASHRAE 140-2007 [63]. Esta norma avalia as capacidades térmicas e aplicabilidade de cada *software*. Para tal, são simulados casos teste, em concordância com a norma, permitindo um enquadramento que possibilita a validação dos resultados nas vertentes analítica, comparativa e empírica.

O EnergyPlus é provavelmente a ferramenta mais poderosa entre estes, porém a sua maior desvantagem é sua interface gráfica pouco “*user friendly*”. Deste modo é muitas vezes usados programas auxiliares como o DesignBuilder que detêm de uma interface gráfica bastante dinâmica e intuitiva, e cujo motor de cálculo opera com as mesmas ferramentas de cálculo e algoritmos que o EnergyPlus.

No entanto, para esta dissertação o DesignBuilder apresenta uma enorme lacuna, em termos de armazenamento de energia térmica só permite a instalação de caldeiras. A introdução de bancos de gelo é permitida no EnergyPlus [64], porém no DesignBuilder isso não é possível. O TRNSYS também permite a instalação de bancos de gelo, sendo a sua implementação estudada em [65].

Como se pretende verificar a influência dos sistemas de energia renovável, é necessário recorrer a uma ferramenta computacional que permita estimar a produção destes sistemas, em especial solar e eólica. O DesignBuilder (e consequentemente o EnergyPlus) a partir da versão 4, permite a instalação destes sistemas. Em [66], é estudada a implementação dos painéis solares térmico, numa instalação com piso radiante. Utilizando o TRNSYS, em [67] é realizado um estudo técnico da integração da utilização de painéis fotovoltaicos e geradores eólicos num sistema com armazenamento de hidrogénio. Similarmente ao que foi realizado com o TRNSYS, em [68] é utilizado o ESP-r para verificar qual seria o potencial da instalação de painéis fotovoltaicos e geradores eólicos no setor residencial canadiano.

Os programas de simulação dinâmica de edifícios não tendem a ser ideias para a utilização de controlos avançados como os estudados, pois estes tornam-se lentos e têm optimizadores limitados. Assim sendo, é necessário recorrer a programas secundários que permite realizar e implementar tal controlo. Os programas de simulação dinâmica permitem conexão a programas mais adequados para a implementação dos sistemas de controlo, tais como MATLAB ou Simulink (MPC toolbox). O MATLAB também pode ser

combinado com outros programas, permitindo assim realizar as estratégias de otimização em programas como por exemplo o GenOpt.

O TRNSYS através de uma componente denominada de Type155 consegue realizar a conexão direta entre o TRNSYS e o MATLAB. Porém este método não é o mais eficaz e há outros programas que não possuem uma componente idêntica que permita conectar diretamente com um programa secundário. Existe também o MLE+ que é uma MATLAB/Simulink toolbox para co-simular com um edifício presente em EnergyPlus. Porém, esta ferramenta só funciona com EnergyPlus. Deste modo, a conexão entre os diferentes *softwares* é geralmente realizada pelo *Building Controls Virtual Test Bed* (BCVTB), pois é um programa mais geral e permite que outros programas como o EnergyPlus, TRNSYS, ESP-r, MATLAB e Simulink se conectem a ele.

Em [9], de modo a utilizar um MPC para fazer o controlo de um edifício, foi utilizado o EnergyPlus para criar o modelo do sistema, o MATLAB para realizar o controlo e o BCVTB para realizar a conexão entre os dois programas. Em [69] é atingido o mesmo objetivo, porém o EnergyPlus é substituído pelo ESP-r.

Em [70] foi criado um controlo preditivo porém aqui foi usado somente o TRNSYS e o MATLAB, a conexão foi realizada pela via Type155 presente no TRNSYS.

### 1.3.6 Síntese

Em primeiro lugar estudou-se a influência do armazenamento de energia térmica na envolvente do edifício. Assim sendo, colocou-se o foco na Inercia térmica, devido à sua capacidade de armazenar energia térmica. Existem vários métodos que permitem manipular a inercia térmica presente num edifício, sendo os mais promissores, TABS e a utilização de PCMs na envolvente.

TABS permite utilizar as grandes capacidades térmicas da estrutura do edifício, como pisos maciços e tetos, para realizar o armazenamento térmico de energia. O facto de utilizar temperaturas arrefecimento altas e temperaturas de aquecimentos baixas comparadamente aos sistemas tradicionais, permite a este sistema obter poupanças energéticas bastantes significativas. Como TABS é caracterizado pela sua resposta lenta às necessidades dos edifícios, torna o MPC na técnica ideal para ser utilizada com TABS.

PCMs são substâncias que tiram proveito do seu calor latente de modo a poder armazenar grandes quantidades de energia térmica numa quantidade reduzida de material. Quando os PCMs são colocados na envolvente têm vantagens tais como, reduzir a potência de pico utilizada no aquecimento e arrefecimento e permitem a possibilidade de mudar as cargas de pico para horas de tarifas elétricas baixas. Outra vantagem dos PCMs é o facto de a temperatura do material se manter praticamente constante quando ocorre mudança de fase, pois permite que a estratificação de temperatura nos espaços seja minimizada. Porém este material tem como principal desvantagem o facto de a sua condutividade térmica ser relativamente baixa o que pode conduzir algumas limitações.

Apesar da maioria dos estudos sobre PCMs serem em construções opacas, existem também vários estudos que sugerem a colocação desta substância em materiais transparentes (janelas) ou mesmo em componentes de sombreamento (Persianas).

Em seguida foram verificados os vários métodos de utilização de armazenamento de energia térmica nos sistemas de AVAC. Foi apurado que TES em sistemas de climatização pode surgir como uma boa escolha para realizar o controlo de temperatura dos edifícios. Devido ao facto do armazenamento não estar associado à envolvente do edifício, é possível que a energia armazenada seja utilizada quando necessária, mesmo vários dias (ou meses) depois de ser armazenada. O que permite aumentar o poder de aquecimento e arrefecimento dos edifícios quando solicitado. Quando conjugados com sistemas de energia renováveis, é possível diminuir natureza intermitente destes, tornando-se mais eficientes.

Existem três tipos de TES: Sensível, latente e termoquímica. É possível verificar as principais características destes tipos de TES na Tab.1.

Proseguiu-se com a análise da integração de energias renováveis nos edifícios. Isto deve-se ao facto de ser imperativo a utilização destes sistemas caso se pretenda obter um edifício nZEB. Foi verificada a potencialidade de utilizar energia solar, eólica, geotérmica e energia da biomassa nos edifícios.

A energia solar é a mais utilizada mundialmente, e é possível utilizar em sistemas fotovoltaicos, solares térmicos para aquecimento de água e sistemas solares híbridos (contém as duas componentes). Outra grande vantagem é a possibilidade destes painéis serem integrados na envolvente do edifício (BIPV) comparadamente aos BAPV, que é a técnica mais usual. Deste modo é possível obter uma poupança em termos de materiais de construção e dos custos de mão-de-obra normalmente utilizados na construção do sistema não-integrado. Se neste sistema ainda se implementar paredes de Trombe, então também será possível realizar climatização passiva no edifício.

A energia eólica é também usada em grande escala mundial e partilha com a energia solar a sua natureza intermitente. Apesar disso, estes dois tipos têm um grande potencial de serem utilizados nos edifícios, pois permitem produzir energia elétrica diretamente dos seus sistemas.

A energia geotérmica tem um grande potencial de serem utilizadas em conjunto com bombas de calor.

A energia da Biomassa pode ser utilizada para realizar aquecimento através da combustão direta ou pode ser utilizada na conversão química (Biogás).

Foram ainda estudadas estratégias que permitam otimizar o consumo energético dos sistemas de AVAC. Em primeiro lugar procedeu-se à verificação dos vários controlos que podem ser utilizados nos sistemas de AVAC. Como estes não partilham a mesma metodologia foi necessários dividi-los em 5 grupos: Controlo clássico, controlo hard, controlo soft, controlo híbrido e outras técnicas de controlo. Verificou-se que os controlos

clássicos, são limitados e não é possível tirar os melhores resultados deles, sendo este o principal motivo do surgimento de novos controlos que permitem obter melhores resultados em termos energéticos. Apesar de as estratégias de controlo alternativas apresentar melhores resultados, estes partilham de uma série de dificuldades. Os controlos hard requerem especificações que tornam difícil a sua integração em sistemas de AVAC. No entanto, o MPC é visto como uma técnica promissora com inúmeras vantagens. Controladores soft também podem trazer complicações pois necessitam de um conhecimento abrangente das operações do sistema ou de uma ampla gama de condições de funcionamento. Os controladores híbridos, que são constituídos pela junção de controladores hard e soft, surgem como uma boa alternativa pois podem beneficiar das qualidades de ambas as técnicas. Porém também herdam os problemas associadas a essas técnicas o que os torna menos atraentes. Por último, também existem outras técnicas como o DFL, PMAC ou o TPSC, que com as suas características distintas, também já provaram ser opções viáveis no controlo de sistemas de AVAC.

A segunda estratégia surge com o interesse crescente da utilização de fachadas altamente envidraçadas, pois torna o sombreamento um fator importante no controlo de temperatura interior dos edifícios. Deste modo procedeu-se ao estudo dos diferentes tipos de sombreamento existentes, tais como, os que dependem da localização no edifício (interior/exterior) e os que são divididos conforme a sua possibilidade de manuseamento (fixos/móveis). Foi verificado que quando projetados e controlados corretamente, estes permitem uma redução nos consumos energéticos do edifício, como também uma melhoria na qualidade de luz no interior do edifício.

Por último estudaram-se as ferramentas de simulação dinâmica de edifícios e dos sistemas de controlo. Verificou-se que os programas EnergyPlus e TRNSYS permitem a implementação de um TES no sistema de AVAC. No entanto, apesar do DesignBuilder utilizar o EnergyPlus para realizar as simulações, este só permite a utilização de caldeiras como componente de armazenamento térmico. A implementação de sistemas de energia renováveis também se verificou possível nos principais *softwares* de simulação dinâmica.

Verificou-se que apesar dos programas como o TRNSYS ou EnergyPlus produzirem bons resultados, estes eram incapazes de implementar controlos avançados como o MPC. Sendo necessário utilizar outros programas que permitem implementar tais controlos (MATLAB e Simulink). O TRNSYS pode-se ligar ao MATLAB pela via Type155 e o EnergyPlus com apoio do MLE+. Porém estas componentes são restritas aos seus programas, sendo o BCVTB utilizado de uma forma geral pois permite realizar a conexão entre vários programas.

## 1.4 Contributo da dissertação

Tendo em conta o objetivos da dissertação assim como a revisão bibliográfica efetuada, é necessário proceder às escolhas que serão implementadas no caso de estudo da dissertação, que neste caso será um edifício de serviços devido ao facto das necessidades de climatização serem bastante exigentes.

Com o surgimento de regulamentações mais restritas e a necessidade de os edifícios cumprirem com o conceito nZEB até 2020, torna-se imperativo o uso de energias renováveis nos edifícios. Entre elas, a energia solar e eólica têm-se verificado como as mais promissoras, porém sofrem de um enorme problema, a sua intermitência. Assim sendo, quando a energia produzida excede a energia necessária no edifício, o excedente pode ser, ou vendida à rede ou armazenado num dispositivo de armazenamento que permite depois utilizar essa energia quando necessária. Atualmente, o preço de venda de energia à rede é muito menor do que preço de referência de compra de eletricidade, sendo deste modo vantajoso utilizar técnicas de armazenamento de energia. Porém o armazenamento de energia em baterias elétricas é pouco eficiente e torna-se inviável quando aplicado a edifícios de média ou grande dimensão. Assim sendo, a possibilidade de utilizar um armazenamento de energia térmica (TES) torna-se numa solução bastante viável. A utilização de sistemas com TABS, PCMs na envolvente e TES nos sistemas de AVAC revelaram-se práticas bastantes efetivas na redução das necessidades de climatização. TABS tem como principal vantagem o facto de poder ser usado tanto na estação de arrefecimento como de aquecimento, porém é um sistema que só pode ser implementado durante a construção do edifício. Os PCMs são fáceis de serem implementados porém a sua condutividade térmica é baixa e o facto de ser um sistema passivo pode originar complicações no seu controlo. Os sistemas de AVAC com TES têm uma enorme vantagem comparativamente com os anteriores, pois o facto de este sistema não estar diretamente implementado na envolvente do edifício, e em consequência, em contacto direto com a zona climatizada, permite-lhe armazenar energia térmica durante dias sem que esta seja usada. Outra vantagem é o facto de permitir escolher o momento exato em que o sistema entra em funcionamento, o que torna esta opção bastante versátil. Ou seja, é possível utilizar a energia armazenada de modo intercalar, coisa que com os outros sistemas seria muito difícil ou mesmo impossível de implementar.

Optou-se então por utilizar um sistema de AVAC com TES. Entre os vários tipos de TES (sensível, latente e termoquímico), o termoquímico é sem dúvidas o mais promissor. O problema é que este processo ainda está numa fase inicial de desenvolvimento, o que levou a preferir a utilização de uma tecnologia mais desenvolvida (o armazenamento latente). Como se trata de um edifício de serviços, onde as necessidades de arrefecimento são muito maiores que as de aquecimento, optou-se então pela implementação de um banco de gelo.

Este caso de estudo não utilizara sombreamento, o que permitirá maximizar os ganhos solares no edifício. Como consequência direta, será esperado que as necessidades de aquecimento diminuíssem e as necessidades de arrefecimento aumentam, permitindo assim

um maior período de utilização do banco de gelo. Também será possível reduzir o custo associado à iluminação.

Nesta dissertação são estudados vários controlos avançados que permitem obter resultados positivos quando conjugados com sistemas de armazenamento de energia térmica (principalmente o MPC). Todavia, estes controlos são bastante específicos e complexos, sendo únicos para cada edifício. A implementação de sistemas de energia renováveis iria aumentar drasticamente a sua complexidade, podendo impossibilitar a obtenção de resultados credíveis. Deste modo, como o objetivo da dissertação reside na implementação de um armazenamento de energia térmica em conjunto com um sistema de energia renovável, será necessário recorrer a estratégias de controlo mais simples.

Será utilizado o DesignBuilder na construção do edifício e na implementação dos pressupostos de funcionamento do edifício (Ex: ocupação, iluminação, ventilação,..). Porém, como este *software* não permite a introdução de um banco de gelo no sistema de AVAC, será então necessário recorrer ao EnergyPlus para completar a sua implementação. Desta forma, todas as simulações dinâmicas serão realizadas diretamente no EnergyPlus.

Após realizada a análise da metodologia a ser aplicada na dissertação, os contributos esperados para o presente trabalho serão:

1. Estudar a viabilidade energética da implementação de um banco de gelo num sistema de AVAC
2. Analisar diversas estratégias de utilização do banco de gelo.
3. Analisar a produção de energia elétrica proveniente dos sistemas de energia renovável (solar e eólica).
4. Estudar o impacto da introdução dos sistemas de energia renovável no consumo energético do edifício e na conjugação com o banco de gelo.
5. Analisar a viabilidade económica das implementações propostas.

## 1.5 Organização do documento

A presente dissertação encontra-se dividida em quatro capítulos.

No Capítulo 1 começa-se por contextualizar o estudo e definir os objetivos. Em seguida é apresentada a revisão bibliográfica que é dividida em seis partes, sendo a última parte uma síntese do conteúdo exposto. Neles são abordados a importância da utilização do



armazenamento de energia térmica no controlo térmico, as possíveis implementações dos sistemas de energia renovável, são identificadas estratégias que promovem a eficiência dos sistemas de AVAC e verificadas as ferramentas computacionais que estão disponíveis para a obtenção dos objetivos propostos. Por último são explicados as opções tomadas e definidos os contributos esperados para a dissertação.

No Capítulo 2 é caracterizado o modelo do caso de estudo, são definidos os pressupostos e considerações gerais e o tipo de abordagem adotado é detalhadamente exposto.

No Capítulo 3 é feita a apresentação e análise dos resultados. Nele são realizadas três simulações distintas, tanto para um perfil diário como para um perfil semanal. A primeira simulação é realizada com as condições padrão, segue-se uma simulação com as condições otimizadas, e na terceira é inserido um sistema de energia renovável de modo a verificar qual o potencial de tal instalação quando conjugado com um banco de gelo. No final é verificado a viabilidade económica e energética das simulações realizadas.

No capítulo 4 são apresentadas conclusões gerais da dissertação e apresentadas possíveis linhas de investigação para futuros trabalhos.

## Capítulo 2

### 2 Metodologia de análise

Neste capítulo pretende-se apresentar detalhadamente a metodologia de trabalho, desde a caracterização do modelo de simulação, definição das considerações e pressupostos gerais, apresentação dos dados climáticos e legislação em vigor. Ao longo da apresentação da metodologia adotada são também justificadas todas as opções tomadas.

#### 2.1 Caracterização das componentes comuns à simulação

Neste tópico serão apresentadas as características comuns a cada simulação apresentada. Estes dados foram introduzidos na ferramenta de simulação dinâmica *DesignBuilder* versão 4.2.

Neste trabalho não foi levada em consideração a regulamentação portuguesa existente relativa ao desempenho energético dos edifícios, nomeadamente o Sistema de Certificação Energética de Edifícios (SCE) [71]. No entanto, isto não significa que se tenha ignorado as características necessárias para um bom funcionamento do edifício. Deste modo foram utilizados, maioritariamente, perfis pré-existentes dentro do *software*. É pressuposto que estes apresentem características realísticas e que respeitem as normas tanto nacionais como internacionais.

##### 2.1.1 Dados climáticos

Como o objetivo deste estudo incidiu na tentativa de diminuição das necessidades de arrefecimento do edifício, seria importante selecionar uma localização em que esta componente tivesse alguma relevância. Por outro lado, selecionar uma região com Verões extremamente quentes e/ou, uma região com características tropicais onde exista uma necessidade constante de arrefecimento ao longo de todo o ano, para exponenciar os resultados obtidos, também não traria benefício para o estudo.

Deste modo procedeu-se à escolha da cidade do Porto (ficheiro climático PRT\_Porto.085450\_IWC), pois apesar de situar-se no Sul da Europa, esta apresenta Invernos e Verões amenos comparadamente a outros países do sul de Europa, permitindo servir de modelo para a retirada de resultados coerentes.

Tabela 2 - Dados climáticos para a cidade do Porto

Estação	Latitude	Longitude	Altitude	Fuso horário	Temperatura média
Porto	41°23' N	8°70' E	73	WET	10°

### 2.1.2 Caracterização geométrica e dimensional

As necessidades de arrefecimento num edifício residencial são pouco expressivas comparadamente ao seu consumo total de energia, deste modo optou-se pela utilização de um edifício de Serviços. O edifício utilizado é constituído por 5 pisos. Cada piso apresenta uma área útil de 900 m<sup>2</sup>, com 30 m de comprimento, 30 m de largura e 4,5 m de pé direito. Para potenciar a iluminação natural no edifício, foram colocados na sua fachada Este, Sul e Oeste, envidraços ao longo de toda a sua expansão, apresentando uma área total de 43,36 m<sup>2</sup> por fachada. O edifício não apresenta paredes interiores, sendo constituído apenas por uma zona.

Considerou-se que todos os andares têm características de utilização semelhantes, assim sendo, procedeu-se unicamente à simulação de um dos andares. Como é possível verificar na Figura 4 e 5, foi selecionado o 3º andar, considerando os restantes andares como blocos adiabáticos. Caso fosse selecionado o 1º ou o último andar, os valores de climatização podiam variar ligeiramente pois estes apresentam uma área de envolvente exterior maior comparadamente aos outros andares. Porém como na maioria dos casos, em edifícios de serviços, estes dois pisos tem uma utilização variada dos restantes, optou-se então por realizar a simulação dinâmica de um piso intermédio.

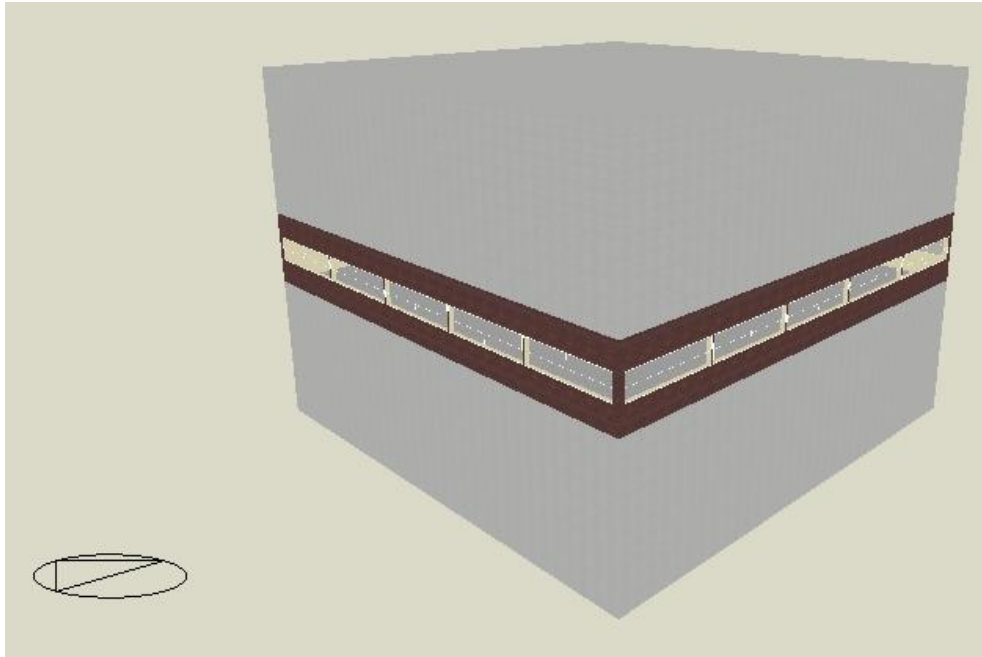


Figura 4 - Perspetiva sul e oeste do edifício modelado no DesignBuilder

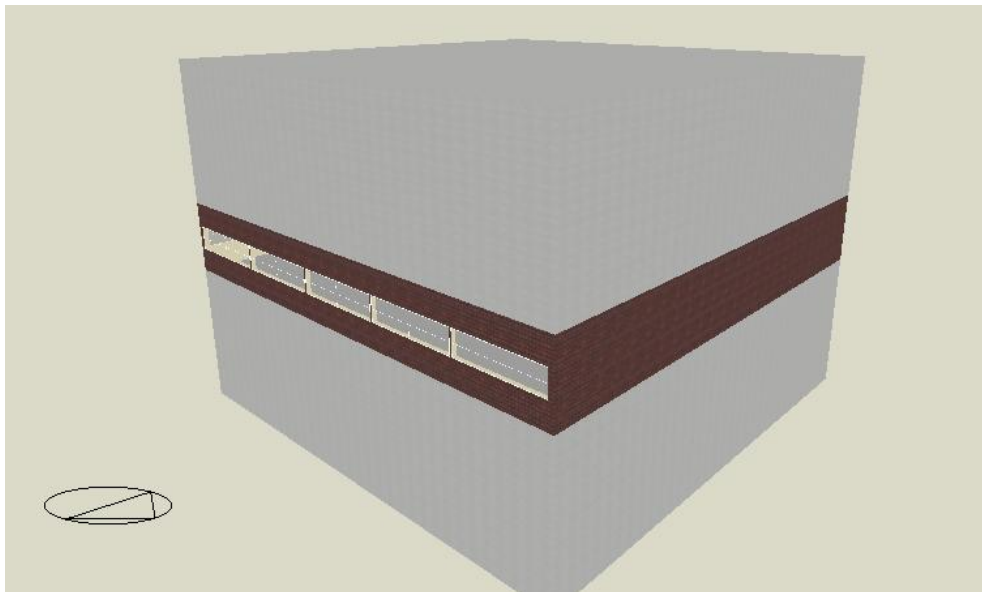


Figura 5 - Perspetiva norte e este do edifício modelado no DesignBuilder

### 2.1.3 Caracterização das opções construtivas

No que respeita à envolvente do edifício, foi utilizado e adaptado o perfil “*Portugal, MediumWeight*” disponível no DesignBuilder. Para as paredes exteriores foram utilizadas o perfil “*Portugal Wall, Medium weight*”, enquanto que para o pavimento e a cobertura, como estes serviam unicamente de divisão entre andares e não estavam expostas a

condições climáticas desfavoráveis, foram utilizadas lajes de betão simples. Os envidraçados são do tipo vidro (claro) duplo com caixa-de-ar, sendo as percentagens de envidraçados nas fachadas de 30%.

Na Tabela 3 é possível verificar todos os componentes da sua envolvente.

**Tabela 3 - Materiais construtivos da envolvente do edifício**

	Materiais	Espessura (mm)	U (W/(m <sup>2</sup> .K))
Paredes exteriores (Portugal Wall, Medium weight)	Reboco (exterior)	100	1,200
	XPS	10,7	
	Betão	100	
	Gesso	13	
Cobertura	Betão	100	4,730
Pavimento	Betão	100	4,370
Envidraçados (vidro claro)	Vidro	6	2,708
	Ar	13	
	Vidro	6	

#### 2.1.4 Caracterização das condições operacionais: ocupação, equipamentos e sistemas

As soluções construtivas apresentadas estão sujeita a cargas térmicas internas que pretendem simular o funcionamento do edifício. Os ganhos internos são provenientes da ocupação, iluminação e equipamentos eletrónicos. Sendo os perfis de utilização de extrema relevância na medida em que definem os ganhos internos do edifício ao longo do dia.

Neste estudo foram utilizados dois perfis de utilização diferentes, um em que o funcionamento seja diário e igual para todo o ano, e outro, em tudo idêntico ao anterior, variando somente os seus dias de utilização. Neste caso, o edifício foi utilizado unicamente de Segunda a Sexta-feira.

Para a simulação ser a mais precisa e realista possível, foi utilizado um perfil “*Generic Office Area*” da categoria “*General Industrial*” presente no *DesignBuilder*, sendo somente alterados os dias de utilização de modo a satisfazer os dois tipos de perfis desejados.

- **Ocupação**

O edifício apresenta uma densidade ocupacional de 0,1079 pessoas/m<sup>2</sup>, com um fator metabólico de 0,90, estando o período e fração de utilização, apresentados na Figura 6.

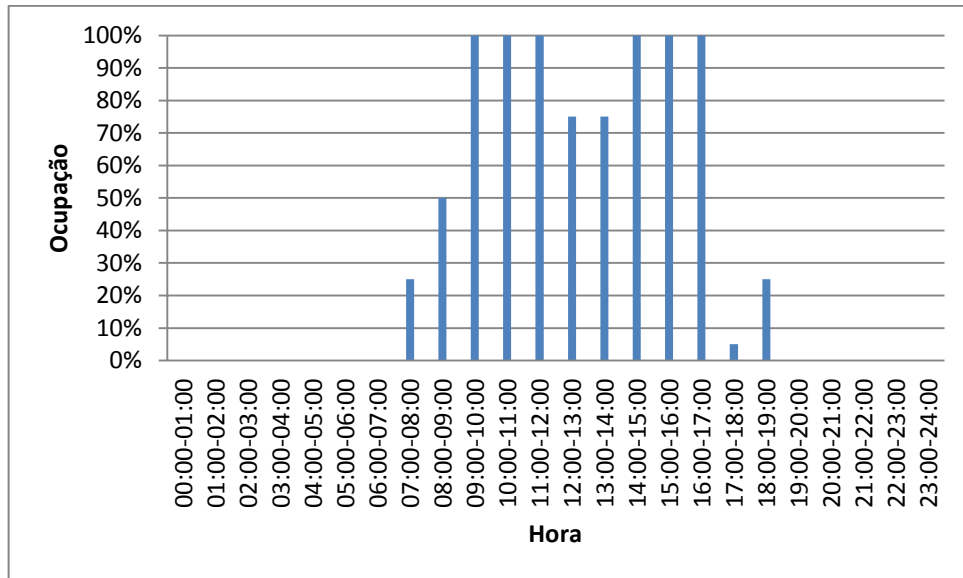


Figura 6 - Perfil de ocupação

- **Equipamentos eletrônicos**

Os equipamentos - computadores, impressoras e outro material de escritório, têm uma fração (da potência total de entrada dos equipamentos) radiante de 0,2.

O edifício está sujeito a uma carga térmica interna de 13,91 W/m<sup>2</sup>, estando o período e fração de utilização, apresentados na Figura 7.

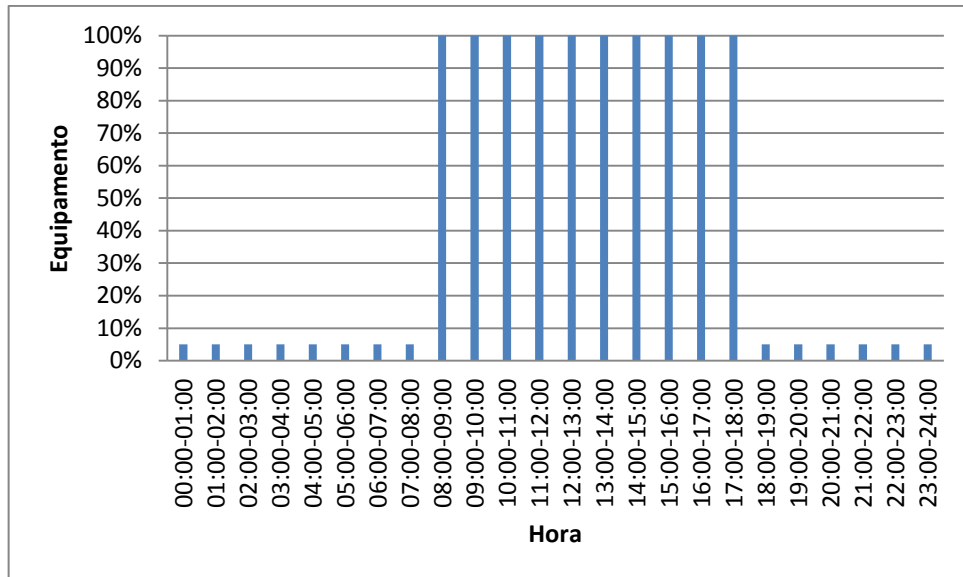


Figura 7 - Perfil dos equipamentos eletrónicos.

- **Iluminação**

Para definir a iluminação foi utilizado o *template* “Portugal”. Neste caso a luminária está suspensa e o sistema de iluminação tem uma fração (da potência total de entrada das lâmpadas) radiante de 0,42 e visível de 0,18.

O sistema de iluminação apresenta um controlo linear, permitindo variar a intensidade da iluminação conforme a disponibilidade da iluminação natural.

O edifício está sujeito a uma carga térmica interna de  $3,4 \text{ W/m}^2\text{-100lux}$ , estando o período e fração de utilização, apresentados na Figura 8.

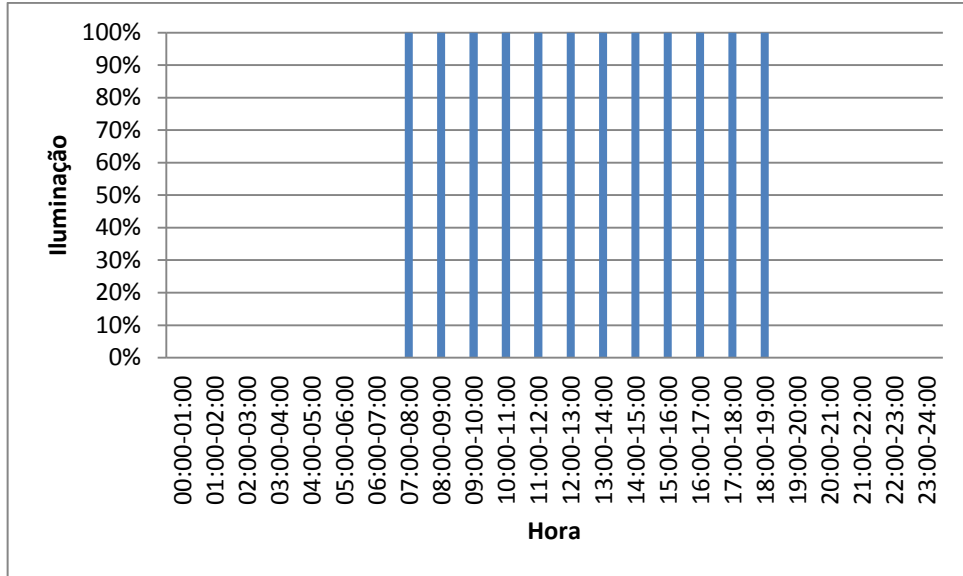


Figura 8 - Perfil de Iluminação

- **Ventilação**

Neste estudo, a ventilação é auto-dimensionada para cada simulação. Apresenta uma eficiência de 70% e é caracterizada pelo perfil de utilização da Figura 9.

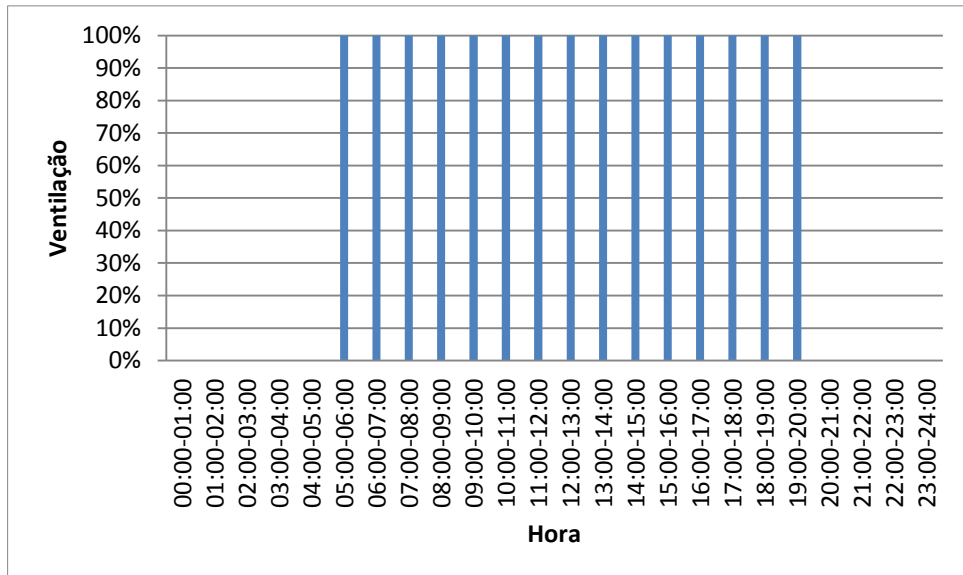


Figura 9 - Perfil de ventilação



- AVAC

O sistema de AVAC de referência do edifício é constituído por uma UTA (unidade de tratamento de ar) com recuperador de calor (efetividade de 75%), chiller de condensação a ar e uma caldeira que suprime as necessidades de climatização (Figura 10).

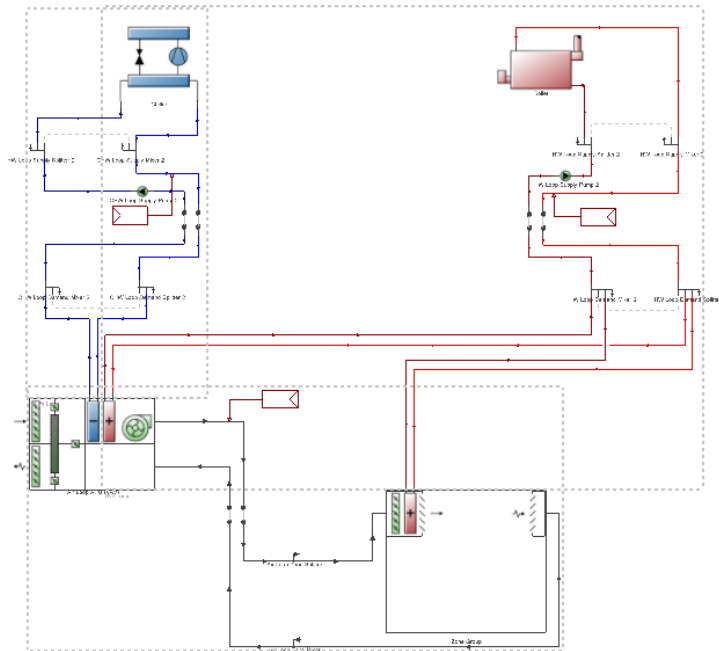


Figura 10 - Sistema de AVAC de referência (VAV Reheat, Air-cooled Chiller)

O chiller possui um COP de referência de 3,5, sendo a potência máxima de arrefecimento variável conforme as necessidades de cada simulação dinâmica efetuada.

A caldeira apresenta uma eficácia térmica de 89%, sendo a sua potência auto-dimensionada pelo sistema.

O perfil de utilização do ventilador é igual ao da ocupação, ou seja, este só está em funcionamento enquanto houver ocupação do edifício.

O sistema de climatização opera sempre que temperatura interior seja menor que 20 °C e maior que 25 °C ou se a temperatura interior seja menor que 12 °C e maior que 28 °C, em caso do edifício estiver desocupado, designando-se o último intervalo por temperaturas *setback*. É possível verificar o seu perfil na Figura 11.

No circuito de arrefecimento, o evaporador, possui um *setpoint* de 7,22 °C. Enquanto o circuito de aquecimento, em funcionamento, tem uma temperatura de saída de 80 °C.

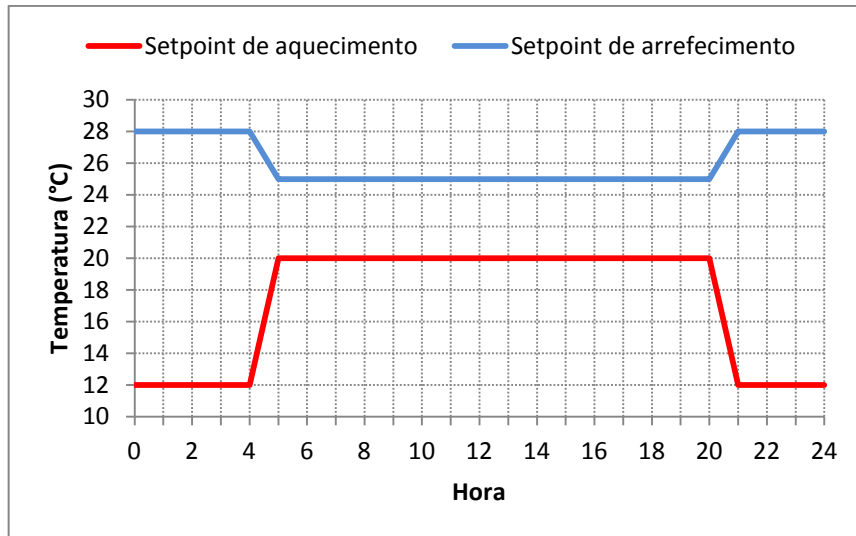


Figura 11 - Perfil de Climatização

## 2.2 Custo da eletricidade

Um dos principais objetivos, para além da diminuição energética do edifício, é obter uma redução do custo monetário associada à eletricidade utilizada, mantendo o seu conforto térmico.

Como se trata de um edifício de serviços onde a potência contratada é geralmente elevada (>20,7 kVA), porém inferior a 41,4 kVA (máximo possível para ser considerado uma ligação de baixa tensão), os comercializadores de eletricidade só permitem a utilização de uma tarifa tri-horária.

A tarifa tri-horária diferencia o preço da energia por kWh de acordo com três períodos horários: horas de vazio, horas cheias e horas de ponta. As horas de vazio ocorrem no período noturno, onde o consumo energético é geralmente baixo, deste modo o preço de energia neste horário é bastante baixo comparadamente à tarifa simples ou bi-horária. O preço nas horas cheias é ligeiramente inferior. Por outro lado, o preço nas horas de ponta é consideravelmente superior, pelo que a tarifa tri-horária é vantajosa para consumos muito reduzidos neste horário.

Na página da Internet da ERSE (Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos) é possível consultar os preços praticados pelos comercializadores de eletricidade [72]. Optou-se pelo tarifário “EDP- Negócios (sem débito direto)”, sendo as suas tarifas apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4 - Tarifário EDP- Negócios (sem débito direto) [72]

Energia (€/kWh)		
Ponta	Cheias	Vazio
0,2923	0,1468	0,0834

Além dos custos associados ao consumo de energia, existe o custo relacionado com a potência contratada ao comercializador de energia. Para o tarifário selecionado, os custos diários estão representados na Tabela 5

Tabela 5 - Custo associado à potência contratada

Potência Contratada (kVA)	Custo diário (€/dia)
27,6	1,4052
34,5	1,7514
41,4	2,0975

Na Figura 12 e 13 é possível visualizar a distribuição dos três períodos horários ao longo do dia, para o horário de verão e de inverno respetivamente. Esta divisão coincide com a hora legal definida por decreto-lei. O horário de verão inicia-se no último domingo de março, o horário de Inverno começa no último domingo de outubro. Porém neste estudo, para simplificar a simulação dinâmica, considerou-se 25 de março, como início do horário de verão e 25 de Outubro como início do horário de inverno.



Figura 12 - Os três períodos horários ao longo do dia (verão)



Figura 13 - Os três períodos horários ao longo do dia (inverno)

### 2.3 Implementação do banco de gelo

Na revisão bibliográfica já foi estudada a importância de um armazenamento de energia térmica inserido num sistema de climatização. O banco de gelo é um sistema de armazenamento de calor latente, sendo a água, neste caso, considerado um PCM.

O banco de gelo é o componente crucial desta dissertação pois permite mudar as necessidades de arrefecimento de pico, onde o preço da eletricidade é alto e a eficiência energética baixa, para horas onde a tarifa elétrica seja mais baixa e a eficiência do processo maior. Ou seja, o banco de gelo será sempre carregado durante as horas de vazio, das 22h até às 8h do dia seguinte, sendo essa energia utilizada ao longo do restante dia.

A introdução do banco de gelo no sistema de AVAC pode ser realizada por três métodos distintos. Este pode ser colocado depois, antes do chiller principal, ou em alternativa, em paralelo com este. A introdução do banco de gelo antes do chiller permite que este tenha um consumo energético baixo, pois quando a água entra no chiller, esta já se encontra a uma temperatura muito próxima da temperatura de saída exigida. A colocação do banco de gelo após o chiller tem um resultado semelhante, porém neste caso, a temperatura de *setpoint* só é obtida após sair do banco de gelo. Estes dois sistemas permitem reduzir ou mesmo anular o consumo energético do chiller nas primeiras horas de utilização diária. Porém estes dois sistemas possuem uma enorme limitação, sempre que o circuito de arrefecimento estiver ativo, o banco de gelo também estará. Isto impossibilita o armazenamento de energia para o uso específico em certos períodos do dia, tal como,

quando o preço de eletricidade está nas horas de pico, pois quando esse momento acontece, a energia armazenada pode já ter sido completamente utilizada. Este sistema só é satisfatório caso a capacidade de armazenamento de energia seja muito elevado, permitindo o uso constante ao longo de todo dia e/ou quando as horas de pico correspondem às primeiras horas de utilização. Um método mais versátil é a implementação do banco de gelo em paralelo com o chiller principal. Deste modo o circuito de arrefecimento pode funcionar sem que este utilize obrigatoriamente a energia armazenada no banco de gelo.

Assim sendo, neste estudo optou-se pela utilização de um sistema que tenha um banco de gelo em paralelo. Como o edifício apresentará sistemas de energia renovável, para além do banco de gelo, optou-se por adicionar um novo chiller. Este chiller tem como único objetivo carregar o banco de gelo. Desta forma, será possível estudar a possibilidade de utilização da energia excedente, gerada pelos sistemas de energia renovável, de modo a colocar em funcionamento o chiller de carregamento e assim voltar a carregar o banco de gelo, sem que haja interferência com a utilização regular do chiller principal. Em termos de manutenção esta implementação também é mais favorável, pois permite climatizar o edifício mesmo que um dos chillers não funcione. Sendo que no caso do chiller do banco de gelo, é possível realizar a sua manutenção durante o período diurno, sem que este interfira no poder de arrefecimento da instalação.

O *DesignBuilder* não permite a introdução de um armazenamento de energia térmica, deste modo foi necessário importar o ficheiro para o *EnergyPlus*, versão 8.3, de modo a introduzir o banco de gelo no sistema de AVAC. Ao sistema de AVAC apresentado no subcapítulo 2.1.4 foi então adicionado, em paralelo ao chiller existente, um novo chiller com um banco de gelo.

Tipicamente, numa simulação do *EnergyPlus*, existe apenas uma bomba de água por circuito (arrefecimento e aquecimento) que controla o fluxo de água nos tubos, porém em alguns casos, este controlo torna-se uma limitação na análise de diferentes opções. Um bom exemplo são as aplicações com bancos de gelo, onde durante a fase de carregamento, o *setpoint* do evaporador pode ser diferente do *setpoint* do banco de gelo. De forma a satisfazer as novas necessidades do circuito de arrefecimento, em primeiro lugar, foi necessário introduzir uma nova bomba de água após a junção dos dois tubos (tubo do chiller principal e do banco de gelo) (Figura 14). Em seguida, nas definições do circuito foi necessário selecionar a opção *TwoWayCommonPipe*. Com este modelo, a interface entre as duas metades do circuito inclui dois trajetos adicionais, que dividem essencialmente o circuito em dois. O primário onde a bomba existente tem um caudal constante e faz circular a água pelos chillers e pelo banco de gelo, e o secundário, onde a bomba controla as necessidades de arrefecimento da instalação.

A Figura 15 mostra o esquema do modelo *TwoWayCommonPipe*. Os dois trajetos adicionais estão representados pelas duas linhas a tracejado, podendo assim utilizar dois *setpoints* diferentes no circuito de arrefecimento, tal como foi desejado.

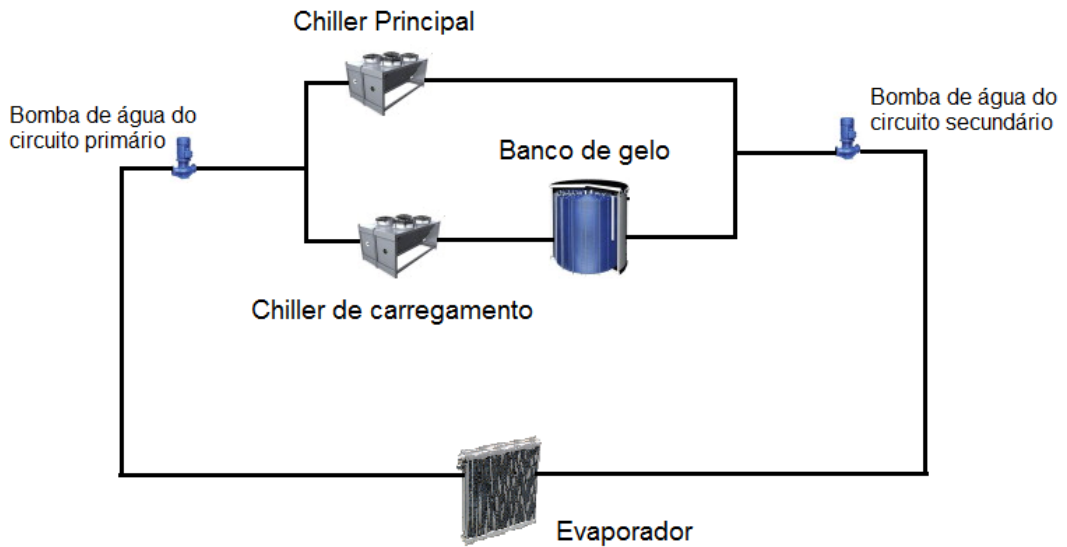


Figura 14 - Circuito de arrefecimento do sistema de AVAC após introdução do banco de gelo

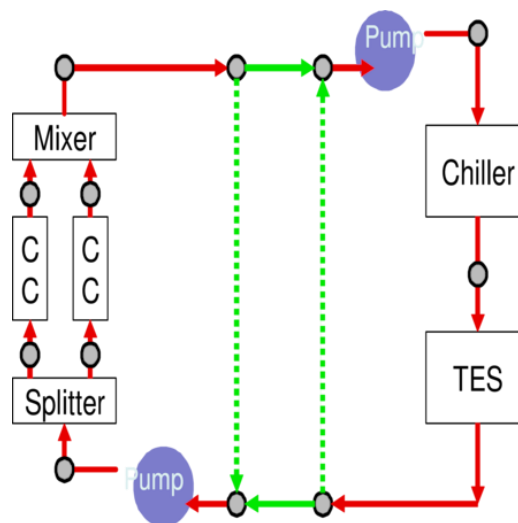


Figura 15 - Esquema de um modelo *TwoWayCommonPipe*

A temperatura de *setpoint* no evaporador é  $7,22\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Para que isso seja possível, a água à saída do chiller principal necessita de estar a essa temperatura. Porém o banco de gelo apresenta características diferentes. Como já foi referido anteriormente, o principal objetivo da utilização de bancos de gelo é aproveitar a seu calor latente. Para que isso ocorra, é necessário modificar a água líquida para o seu estado sólido (gelo). Esta mudança de fase ocorre aos  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Assim sendo, o chiller de carregamento necessita de funcionar a temperaturas extremamente baixas. Neste caso específico, o *setpoint* à saída do chiller foi

colocado a -5 °C. Para que a água no circuito também não congele, foi necessário adicionar glicol à água. Neste caso, 25% da concentração é glicol.

Queremos que o novo chiller só funcione em horas de vazio (22h-8h), assim sendo, foi necessário proceder à escolha de um chiller que carregue completamente o banco de gelo nesse intervalo de tempo. Para este estudo inicial optou-se por um banco de gelo com a capacidade de 0,6 GJ (166,67 kWh).

O desempenho real da unidade de armazenagem de gelo depende da geometria física, materiais e das características da unidade do banco de gelo. O manual do *software* EnergyPlus indica que após análise dos dados de desempenho disponibilizados pelos fabricantes de bancos de gelo, determinou-se que a seguinte equação iria funcionar bem para o processo de carregamento/d Descarregamento:

$$q^* = [C1 + C2 P_c + C3 P_c^2] + [C4 + C5 P_c + C6 P_c^2] \Delta T_{lm}^* \quad (\text{eq.1})$$

onde:

$$q^* = \frac{q \Delta t}{Q_{arm}} \quad (\text{eq.2})$$

$$\Delta T_{lm}^* \equiv \frac{\Delta T_{lm}}{\Delta T_{nominal}} \quad (\text{eq.3})$$

$$\Delta T_{lm} \equiv \frac{T_{entrada} - T_{saida}}{\ln \left( \frac{T_{entrada} - T_{solidificação}}{T_{saida} - T_{solidificação}} \right)} \quad (\text{eq.4})$$

sendo a respetiva nomenclatura é apresentada na Tabela 6. Os valores das constantes são apresentados na Tabela 7.

**Tabela 6 - Nomenclatura da equação de carga e descarga do banco de gelo**

Nomenclatura	Descrição
$q$	Taxa de transferência de calor instantânea
$Q_{arm}$	Capacidade total de calor latente do banco de gelo
$\Delta T_{nominal}$	Diferença de temperatura nominal (10 °C)
$T_{entrada}$	Temperatura de entrada do banco de gelo
$T_{saida}$	Temperatura de saída do banco de gelo
$T_{solidificação}$	Temperatura de solidificação (0 °C)
$P_c$	Fração carregada do banco de gelo (modo carga) / Fração descarregada do banco de gelo (modo descarga)

Tabela 7 - Constantes da equação de carga e descarga do banco de gelo

Constantes	Valor
C1	0
C2	0,09
C3	-0,15
C4	0,612
C5	-0,324
C6	-0,216

Em termos teóricos, a potência de arrefecimento necessária seria facilmente calculado pela equação 5.

$$\frac{\text{Capacidade do banco de gelo}}{\text{horas de funcionamento}} = \text{Potência de arrefecimento do chiller} \quad (\text{eq.5})$$

Deste modo, na teoria, um chiller com uma capacidade de arrefecimento de 16,67 kW seria suficientes para carregar o chiller durante a noite. Porém, a temperatura exterior, tal como a equação de descarga/carga, são fatores que alteram a velocidade com que o banco de gelo é carregado. Na Figura 16 é possível verificar que apesar da capacidade de arrefecimento do chiller ser constante (20 kW) ao longo dos dias, somente na madrugada de dia 15 de Julho, é carregado completamente. Isto deve-se ao facto de a temperatura exterior ser mais elevada nos outros dias do que no dia 15.

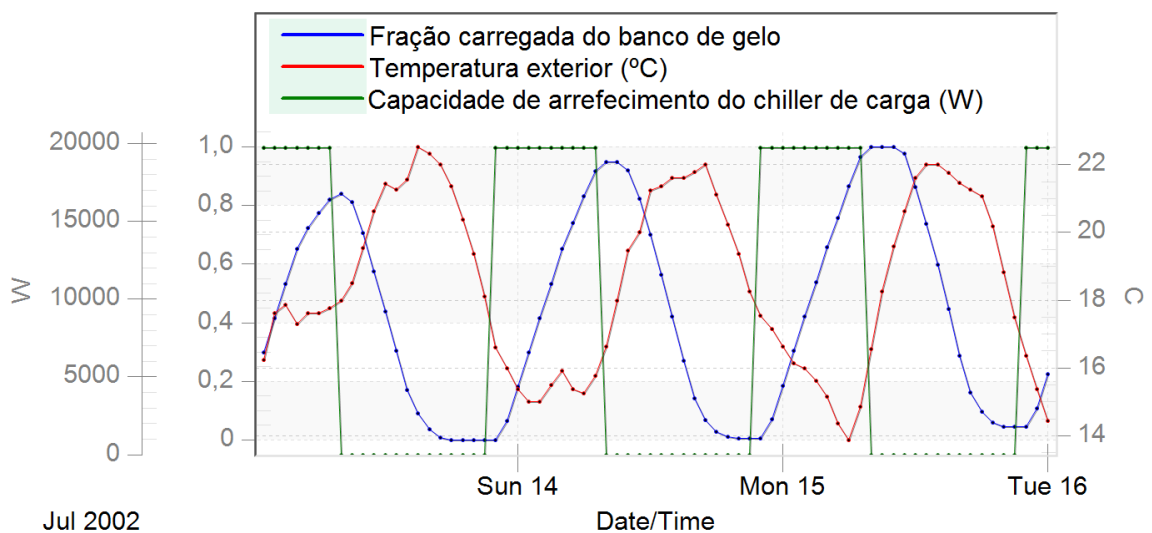


Figura 16 - Gráfico da fração carregada do banco de gelo para um chiller de 20 kW



A colocação de um chiller com capacidade de arrefecimento de 25 kW garante, em todos os casos ao longo do ano, uma carga de pelo menos 95% da capacidade do banco de gelo, sendo este o chiller utilizado nas restantes simulações dinâmicas.

## 2.4 Implementação dos sistemas de energia renovável

O conceito de edifício com necessidades quase nulas de energia, *nearly zero-energy building* (nZEB), passará a constituir padrão mínimo para novas construções a partir de 2020 (2018 para edifícios públicos). Esta meta só será possível reforçando a utilização de energias renováveis nos edifícios, sendo a energia solar e eólica as mais promissoras neste aspeto. Porém, como já foi descrito na revisão bibliográfica, estas fontes de energias possuem uma natureza intermitente. Deste modo, torna-se interessante a utilização de um banco de gelo, pois permite armazenar a energia quando esta excede as necessidades do edifício, para ser usada quando a produção de energia renovável é limitada ou reduzida.

Foi então implementado no edifício de estudo, um gerador eólico e uns painéis fotovoltaicos para que seja possível estudar a integração destes sistemas com a utilização do banco do gelo.

Portugal tem condições favoráveis para a produção de energia solar e eólica, porém estes valores podem variar conforme a região de Portugal em que os sistemas são instalados. Na Figura 17, é possível verificar o potencial eólico e solar para Portugal continental, respetivamente. Para a localidade selecionada (Porto), em termos ao potencial eólico, pode-se concluir que apesar de não ser o local ideal para ser instalado, este apresenta condições mínimas para se tornar uma solução sustentável caso seja instalado junto à costa. Como seria de esperar, regiões montanhosas apresentam o maior potencial para a produção de energia eólica porém não são regiões habitáveis. Deste modo, a região de Lisboa e do oeste algarvio, tornam-se bastante interessantes, pois apresentam densidades populacionais consideráveis e valores de velocidade média do vento elevados.

Em termos de potencial solar, o Porto e a região norte em geral, apresentam valores de radiação solar inferiores aos registados no sul do país. No entanto, é importante salientar, que os valores registados no norte de Portugal, estão consideravelmente acima dos registados nos restantes países da Europa central.

O concelho de Vila do Bispo, no Algarve, é localidade onde seria possível retirar o maior aproveitamento da implantação conjunta dos dois sistemas de energia renovável.

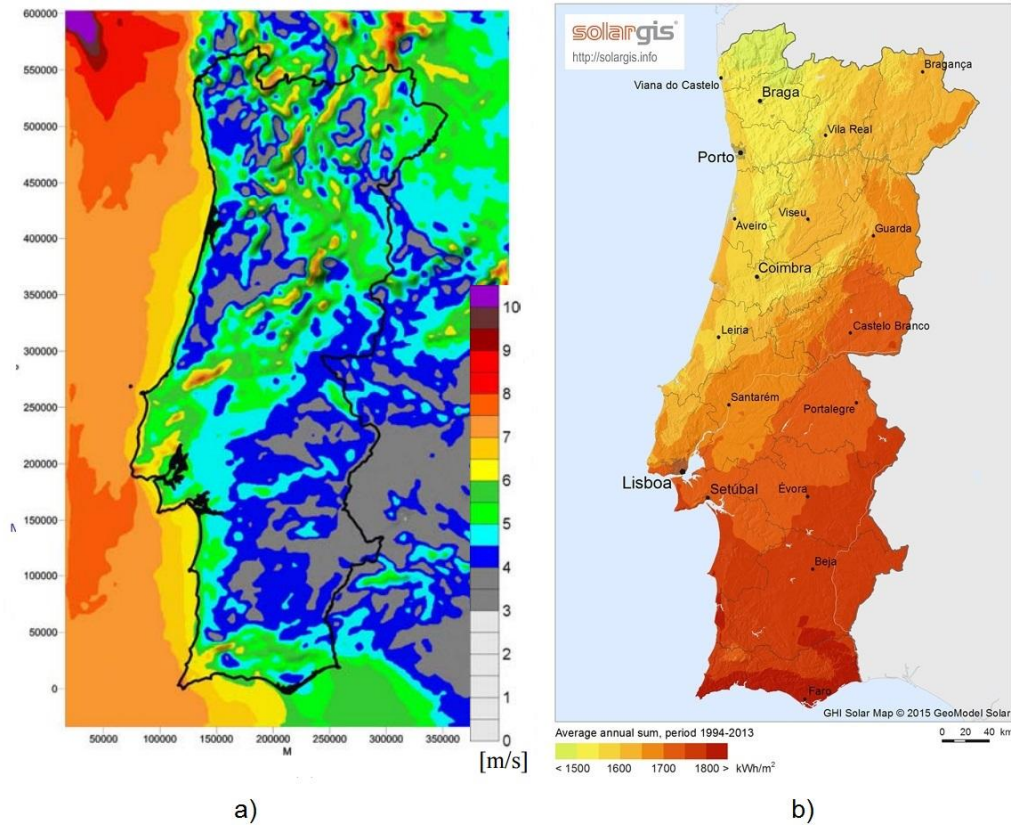


Figura 17 - Potencial eólico (velocidade média do vento a 80m) a) [73] e solar b) [74] para Portugal continental.

- **Energia eólica**

As características do gerador eólico utilizado no estudo, foram baseadas no modelo PGE 20/35 da Energie PGE, sendo os aspetos mais relevantes apresentadas na Tabela 8.

É importante salientar que a localização do gerador é abstrata, ou seja, a produção de energia não é influenciada nem pela posição do edifício nem pelas construções vizinhas. A energia produzida é influenciada unicamente pelas características físicas do próprio gerador e pelos dados disponibilizados no ficheiro climático.

Tabela 8 - Características relevantes do gerador eólico

<b>Tipo de rotor</b>	Horizontal
<b>Controlo da potência</b>	Velocidade variável, Hélice móvel
<b>Potência nominal (kW)</b>	35
<b>Rotação máxima do rotor (rpm)</b>	35
<b>Diâmetro do rotor</b>	19,2
<b>Altura</b>	24
<b>Número de lâminas</b>	3
<b>Velocidade mínima do vento para entrar em funcionamento (m/s)</b>	3
<b>Velocidade máxima do vento permitida para o funcionamento (m/s)</b>	25
<b>Velocidade nominal do vento (m/s)</b>	11

A produção de energia do gerador eólico ( $P_e$ ) é obtida através da equação:

$$P_e = \frac{1}{2} * \rho_{local} * A_r * V^3 * C_p(\lambda, \theta) \quad (\text{eq.6})$$

onde:

$$C_p = C1\left(\frac{C2}{\lambda_i} - C3 * \theta - C4 * \theta^{1,5} - C5\right)e^{-\frac{C6(\lambda, \theta)}{\lambda_i}} \quad (\text{eq.7})$$

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0,08 * \theta} - \frac{0,035}{\theta^3 + 1} \quad (\text{eq.8})$$

sendo a respetiva nomenclatura é apresentada na Tabela 9. Os valores das constantes são apresentados na Tabela 10.

Tabela 9 - Nomenclatura da equação de produção de energia do gerador eólico

<b>Nomenclatura</b>	<b>Descrição</b>
$\rho_{local}$	Densidade do ar à temperatura do rotor
$A_r$	Área varrida do rotor
$V$	Velocidade do tempo
$\lambda$	Rácio de velocidade de ponta
$\theta$	Ângulo de inclinação

Tabela 10 - Constantes da equação de produção de energia do gerador eólico

Constantes	Valor
C1	1
C2	116
C3	0,4
C4	0
C5	5
C6	21

- **Energia solar**

A produção de energia solar é realizada por painéis fotovoltaicos que estão integrados no edifício. Foram colocados painéis (na vertical) nas três fachadas com envidraçados (este, oeste e sul) e no telhado do edifício (Figura 20). Os painéis utilizados possuem um comprimento de 1 m e uma altura de 1,5 m.

Na fachada, procedeu-se à colocação dos painéis em toda a área que não fosse envidraçada, fazendo um total de 90 m<sup>2</sup> por fachada.

No telhado do edifício, em primeiro lugar, foi necessário considerar o qual seria a área útil onde seria possível colocar os painéis fotovoltaicos. Considerou-se que fosse possível utilizar 90% do telhado para esse objetivo. Como a área total do telhado corresponde a 900 m<sup>2</sup>, 90% desse valor seria 810 m<sup>2</sup>. Porém como se trata de um edifício de serviços com 5 andares, e como foi considerado que todos os andares teriam um perfil de utilização semelhante ao estudado, foi necessário dividir esse valor por 5. Deste modo, a cada piso é atribuído uma área de 162 m<sup>2</sup>.

Para obter a maior produção anual de energia fotovoltaica, houve necessidade de verificar qual seria o ângulo ideal dos painéis em relação ao edifício. No *website* da JRC (*Joint Research Centre*) da comissão europeia [75], existe um mapa interativo com um “*Photovoltaic Geographical Information System*” que permite estimar a quantidade de energia gerada ao longo do ano, dependendo da sua localização. É concluído que para a região do Porto, o ângulo ideal é de 35°.

Em seguida foi necessário verificar qual seria a distância mínima entre fileiras de painéis, de modo a não haver sombreamento em qualquer altura do ano e assim retirar o máximo aproveitamento de energia solar. Para obter esse valor, em primeiro lugar, foi necessário saber qual é a inclinação dos raios solares no solstício de inverno (dia 21 de Dezembro). Isto deve-se ao facto de nesse dia, o sol atingir o seu ponto mais baixo do ano, provocando desta forma, a maior sombra do ano. Verificou-se que no ano 2015, às 12:32, o sol possui um ângulo de 25° em relação ao horizonte [76].

Sabendo a altura ( $a$ ) e inclinação ( $\theta$ ) dos painéis, e o angulo mínimo do sol no solstício de inverno ( $\varphi$ ), usando as regras de trigonometria (Figura 18 e 19), é facilmente calculado a distância mínima entre fileiras.

Sabendo que,

$$h = \text{sen}(\theta) * a \quad (\text{eq.9})$$

$$c = \text{cos}(\theta) * a \quad (\text{eq.10})$$

$$90 = \varphi + \alpha \quad (\text{eq.11})$$

$$d = \text{tg}(\alpha) * h \quad (\text{eq.12})$$

$$d = \text{tg}(\alpha) * h \quad (\text{eq.13})$$

$$x = d + c \quad (\text{eq.14})$$

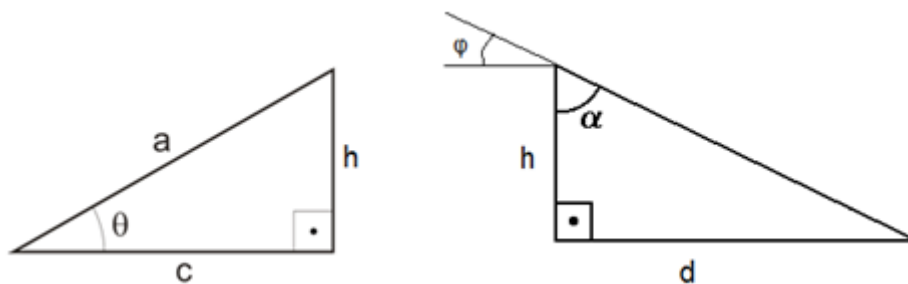


Figura 18 - Ilustração do problema em triângulos retângulos

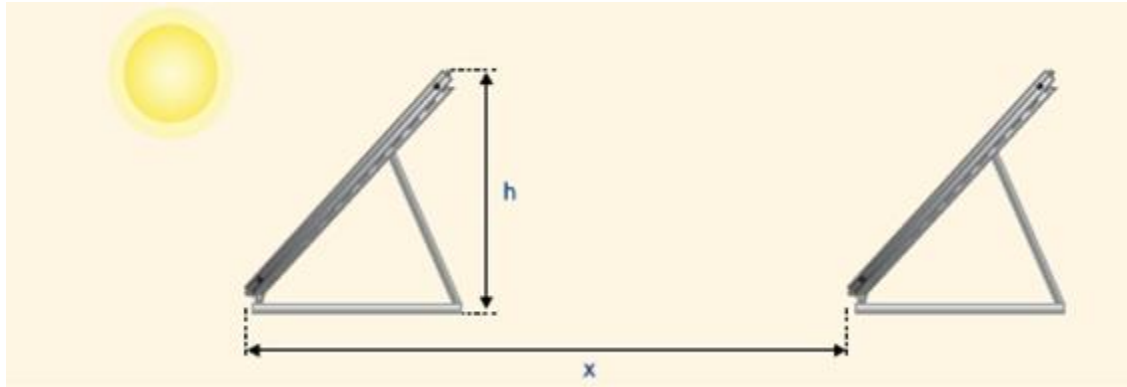


Figura 19 - Ilustração da distância mínima entre painéis.

é possível verificar que a distância mínima entre fileiras ( $x$ ) é de 3,07 m. Sendo que a parcela de painéis visíveis no telhado do edifício (Figura 20), ter as dimensões, 12 m de comprimento e 13,51 m de largura (5 fileiras), correspondente aos 162 m<sup>2</sup> disponível para cada andar.

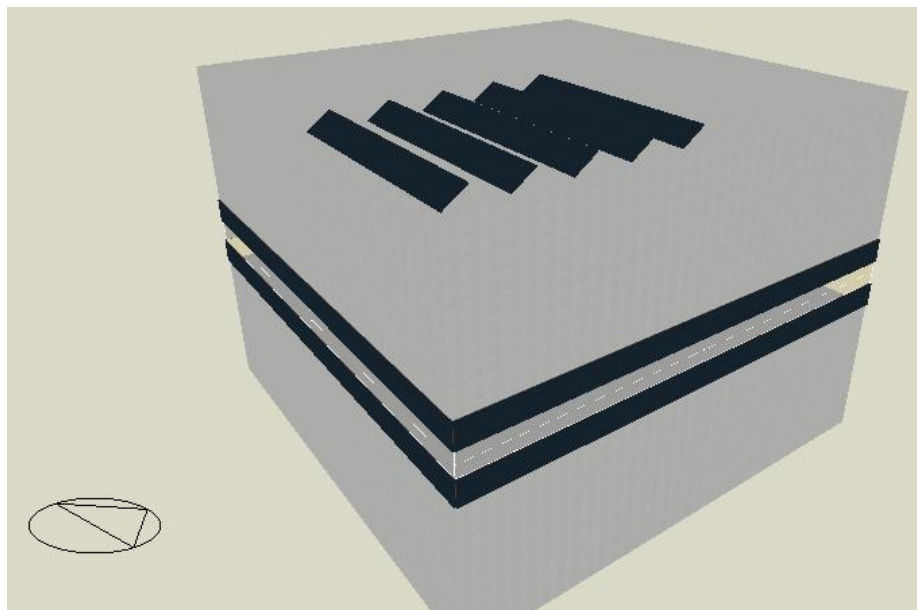


Figura 20 - Edifício de estudo com painéis solares.

Para determinar o desempenho de pico de um módulo fotovoltaico, os fabricantes testam os seus produtos usando condições específicas para que os dados sejam confiáveis e repetíveis durante uma série de testes. Em condições de teste normais STC (*Standard Test Conditions*) a irradiação solar corresponde a 1000 W/m<sup>2</sup> [77]. Deste modo, um painel com eficiência de 15% permite utilizar 150 W/m<sup>2</sup>. A instalação possui 360 m<sup>2</sup> de painéis,

correspondendo esse valor a 54 kW. Porém, apenas 90% dos módulos estão cobertos pelas células ativas, logo o desempenho máximo dos módulos equivale a 48,6 kW.

Para calcular a potencia elétrica produzida pelos painéis em cada momento, o EnergyPlus usa a seguinte equação.

$$P = A_{sup} * fact * G_T * \eta_{cel} * \eta_{inv} \quad (eq.15)$$

Somente  $G_T$  é calculado pelo EnergyPlus, sendo os restantes variáveis inseridas pelo utilizador. Esses dados são apresentados na Tabela 11.

**Tabela 11 - Nomenclatura e valores inseridos para o cálculo da potência elétrica produzida pelos painéis fotovoltaicos**

Nomenclatura	Descrição	Valores inseridos
$P$	Potência elétrica produzida pelos fotovoltaicos [W]	-
$A_{sup}$	Área total da superfície [m <sup>2</sup> ]	360
$fact$	Fração da superfície com células solares	0,90
$G_T$	Total da radiação incidente nos painéis [W/m <sup>2</sup> ]	-
$\eta_{cel}$	Eficiência do módulo	0,15
$\eta_{inv}$	Eficiência do inversor	0,9

#### 2.4.1 Legislação sobre a venda de energia elétrica em Portugal

Com a entrada em vigor do Decreto-Lei n.º 153/2014 [78], tornou-se possível consumir a energia elétrica produzida no edifício. Até à entrada em vigor desta legislação, a energia produzida pelos sistemas de energia renovável tinha que ser obrigatoriamente injetada e vendida à rede, não podendo por isso ser utilizada para reduzir os consumos do edifício.

Com o novo regime o paradigma mudou. Os consumidores têm a opção de consumir a energia produzida nos seus próprios sistemas e podem dessa forma reduzir de energia elétrica comprada à rede, aumentar a eficiência energética da do edifício, ter um maior controlo sobre os consumos, pois permite redirecionar os consumos para as horas de maior produção de energia, e injetar na rede elétrica de serviço público (RESP) o excedente da produção.

Em termos de licenciamento, equipamentos com potências iguais ou inferiores a 200 W estão isentos de controlo. Para sistemas entre 200 W e 1500 W é necessário uma comunicação prévia às entidades reguladoras. No entanto, sistemas de autoconsumo em que se pretenda vender a eletricidade que é injetada na rede pública carecem de um registo formal. Para sistemas entre 1,5 kW e 1 MW é necessário realizar registo, inspeção e estar

certificado. Para potências superiores a 1 MW é necessário obter licença de produção e exploração. Caso o consumidor tenha uma unidade de produção com potência superior a 1500 W, ligada à rede pública, tem de pagar às entidades competentes uma compensação fixa durante 10 anos. O montante é baseado na potência instalada e nos CIEG (Custos de Interesse Económico Geral), entre outros fatores. A compensação a pagar apenas se torna efetiva quando a representatividade do sistema excede 1% do total da potência instalada no Sistema Elétrico Nacional (SEN). Em 2013 esse valor correspondia a 180 MW [79].

Na Tabela 12, é possível visualizar um resumo dos principais requisitos exigidos às UPAC (unidade produtora para autoconsumo)

**Tabela 12 - Análise sumária dos principais requisitos exigidos às UPAC [79]**

Dimensão das UPAC ligadas à RESP (Potência de ligação)				
	<200W	200-1500W	1,5kW – 1MW	>1MW
Registo	-	Mera comunicação prévia	Controlo prévio/ Certificado de Exploração	Licença de exploração
Taxas de Registo	-	Isento	Sim	Sim
Equipamento de contagem	-	-	Sim. Com telecontagem	Sim. Com telecontagem
Remuneração excedente	Apenas se existir registo	Apenas se existir registo	Sim	Terá de ser definida com contraparte
Compensação	Isento	Isento	Sim	Sim
Seguro Resp. Civil	-	-	Sim	Sim

É importante salientar que estes sistemas possuem limitações à sua utilização. A produção anual deve ser inferior às necessidades de consumo, pois caso isso não aconteça, toda produção superior ao consumo não será renumerada. A potência de ligação não pode ser maior que à potência contratada, sendo deste modo, desfavorável para consumidores com potências contratadas baixas.

O valor de energia elétrica fornecida à RESP é calculado pela seguinte expressão:

$$R_{UPAC,m} = E_{fornecida,m} * OMIE_m * 0,9 \quad (\text{eq.16})$$

sendo:

- $R_{UPAC,m}$  - a remuneração de eletricidade fornecida à RESP no mês “m”, em €;
- $E_{fornecida,m}$  - A energia fornecida no mês ‘m’, em kWh;



- $OMIE_m$ - O valor resultante da média aritmética simples dos preços de fecho do Operador do Mercado Ibérico de Energia (OMIE) para Portugal (mercado diário), relativos ao mês 'm', em €/kWh;
- «m» — O mês a que se refere a contagem da eletricidade fornecida à RESP.

Para este trabalho, foi selecionado o mês de Outubro de 2015. O valor de  $OMIE_m$  para esse mês corresponde a 49,90 €/MWh [80]. Quando multiplicado por 0,9, é possível verificar que o valor final pago pela energia excedente será de 44,91 €/MWh. Apesar deste valor ser variável todos os meses, o valor de Outubro foi usado como referência para todos os meses da simulação.

Este valor é extremamente baixo, sendo menor que o custo de energia nas horas de vazio. Assim sendo, a opção mais favorável é aquela que permite retirar um maior proveito da energia autoconsumida, e assim diminuir tanto a energia comprada como a vendida à rede.

## 2.5 Procedimentos

No que diz respeito ao procedimento de estudo, este encontra-se dividido em duas partes: A aplicação do banco de gelo no sistema de climatização e a aplicação dos sistemas de energia renovável na fachada do edifício.

### 2.5.1 Aplicação do banco de gelo

Para verificar a viabilidade da implementação de um banco de gelo num sistema de climatização, tanto em termos energéticos como económicos, para dois perfis de utilização distintos, foram criados quatro casos de estudo distintos.

- **Caso 1 - Edifício sem banco de gelo**

Representa a simulação de referência. Este edifício apresenta um sistema de climatização com um funcionamento normal, sem o banco de gelo.

- **Caso 2 - Edifício com banco de gelo de apoio ao chiller principal**

Para além do sistema de climatização normal, este caso, também apresenta um banco de gelo que serve de apoio ao chiller principal. Nesta simulação, o chiller não possui

limitações de utilização, sendo o objetivo do banco de gelo, reduzir os picos de funcionamento do chiller ao longo do dia

- **Caso 3 - Edifício com banco de gelo de apoio ao chiller principal, evitando o uso do chiller em horas de ponta**

Esta análise é idêntica ao caso 2, a única divergência é a não utilização de energia elétrica durante as horas de ponta (das 10:30h às 13:00h e das 19:30h às 21:00h).

- **Caso 4 - Edifício onde o banco de gelo tem prioridade sobre o chiller (*storage-priority*)**

Nesta simulação, o banco de gelo é o principal sistema de arrefecimento. O chiller só entra em funcionamento quando o banco de gelo estiver descarregado. Este processo permite reduzir ou mesmo suprimir a necessidade de utilização do chiller principal.

- **Caso 5 - Edifício onde o banco de gelo tem prioridade sobre o chiller (*storage-priority*), evitando o uso do chiller em horas de ponta**

Tal como no caso 3, esta análise é idêntica ao seu antecessor, sendo a única diferença a não utilização de energia elétrica (no sistema de climatização) durante as horas de ponta. Satisfazer esse requisito durante as primeiras horas de ponta (10:30h às 13:00h) é relativamente fácil. Porém o problema reside em satisfazer essas necessidades para o segundo período (19:30h às 20:00h), pois é impossível determinar se nesse horário o banco de gelo está ou não, completamente descarregado. Deste modo, para não prejudicar o conforto dos utilizadores, não será possível satisfazer esse requisito sem a utilização de um controlo avançado ou um banco de gelo de maior capacidade. Para minimizar esse impacto foi permitido o uso do chiller principal até às 10:30h, para que desse modo, em dias de maior calor, pudesse funcionar num período mais eficiente (temperaturas exteriores inferiores). O banco de gelo também só está disponível a partir das 10:30h.

## 2.5.2 Aplicação dos sistemas de energia renovável

Foi também estudado o impacto de dois sistemas de energia renovável (eólico e solar) no edifício e a sua conjugação com o banco de gelo.

Esta dissertação pretende ir de encontro à legislação futura sobre os *nZEB*, logo torna-se imperativo o uso da energia produzida pelos sistemas, diretamente no edifício, ou seja, uma solução de autoconsumo.

Como foi referido anteriormente, a nova legislação portuguesa permite que eletricidade proveniente dos sistemas de energia renovável, seja utilizada para suprimir as necessidades de energia do edifício (autoconsumo), e caso desejado, injetar o excedente na rede elétrica.

Deste modo, um dos objetivos deste estudo é verificar a potencialidade existente no autoconsumo, pois permite ao utilizador diminuir significativamente a energia comprada à rede. Como também foi mencionado anteriormente, o preço de venda de energia excedente é extremamente reduzido, assim sendo, foi estudado a possibilidade de usar a energia excedente, no chiller do banco de gelo e assim carregar o banco de gelo. Apesar do chiller funcionar somente nas horas de vazio, onde o preço de eletricidade é reduzido, o preço de venda de eletricidade apresenta preços inferiores aos aplicados nessas horas. Desta forma, enquanto o preço de venda seja inferior ao de compra, será sempre desejável carregar o banco de gelo do que injetar eletricidade na rede.

O *EnergyPlus* permite verificar diretamente qual o consumo real, caso se opte pela estratégia de autoconsumo, porém não detêm um controlo avançado que permita usar os excedentes de produção para ativar outras componentes no edifício (neste caso o chiller). Assim sendo, para retirar esses dados foi necessário proceder ao cálculo manual de eletricidade excedente que podia ser utilizado para carregar o chiller. De forma a verificar a veracidade dos resultados obtidos foi necessário utilizar a seguinte equação:

$$\text{Consumida} - \text{Produzida} = \text{Comprada} - \text{Excesso} \quad (\text{eq.17})$$

ou seja, sabendo que para cada caso de estudo, a relação entre a eletricidade consumida e produzida é sempre constante, é possível verificar que todo o excesso de produção utilizado para carregar o chiller terá uma redução de igual valor na energia comprada.

Como já foi mencionado anteriormente, uma das limitações da legislação sobre o autoconsumo refere que a energia produzida não pode ser superior à energia consumida no edifício. Deste modo é necessário garantir que o valor obtido não seja inferior a zero, pois caso isso aconteça, indica que a produção é maior que o consumo.

## Capítulo 3

### 3 Resultados e análise

Neste capítulo serão apresentados os resultados das várias simulações dinâmicas efetuadas. Num primeiro momento, foi utilizado o *summer design day* (15 de Julho) como dia de referência para visualizar e analisar os consumos energéticos ao longo do dia. Na simulação, este dia serve para definir valores para as componentes auto-dimensionadas. No entanto, este também representa um bom exemplo para um típico dia de verão, sendo ideal para verificar as suas condições de funcionamento. Após essa análise, foram apresentados os consumos para o horário de verão (25 de março a 25 de outubro), isto deve-se ao facto do banco de gelo só estar disponível nesse período, não havendo diferença de consumos no horário de inverno.

#### 3.1 Perfil diário

Aqui serão analisados os resultados das simulações para um perfil de utilização diário.

##### 3.1.1 Aplicação do banco de gelo

Em seguida serão apresentados os resultados para os diferentes casos de estudo.

• **Caso 1 - Edifício sem banco de gelo**

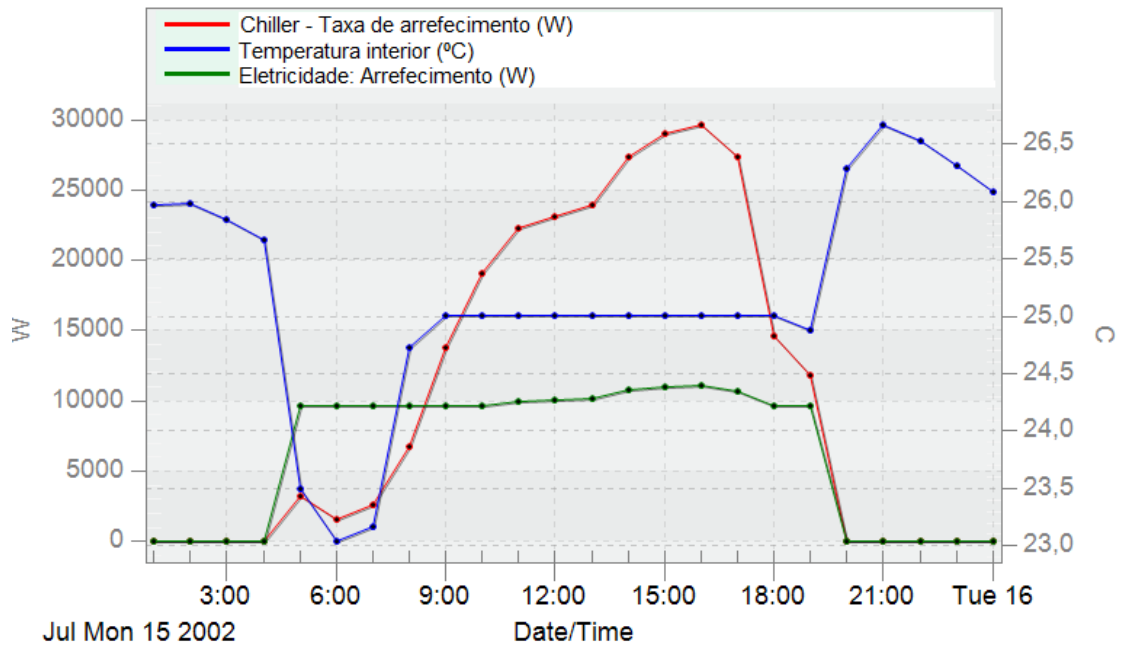


Figura 21 - Necessidade de arrefecimento ao longo do dia - Caso 1

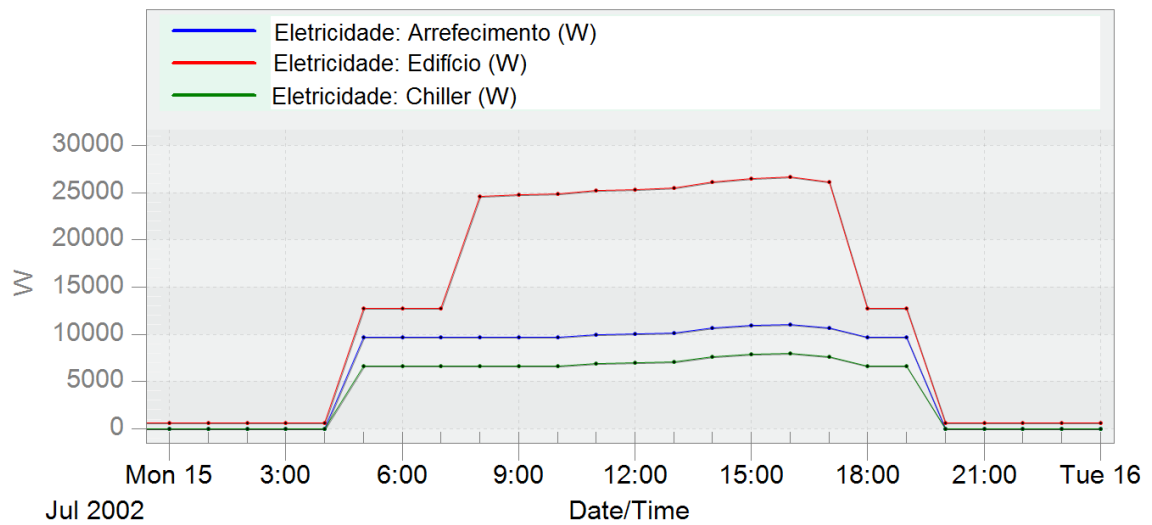
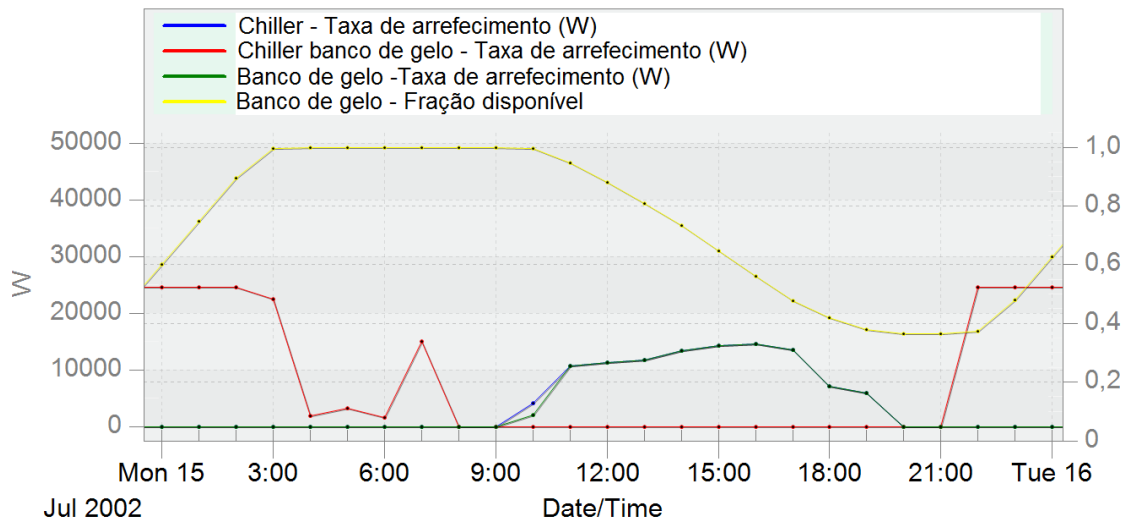


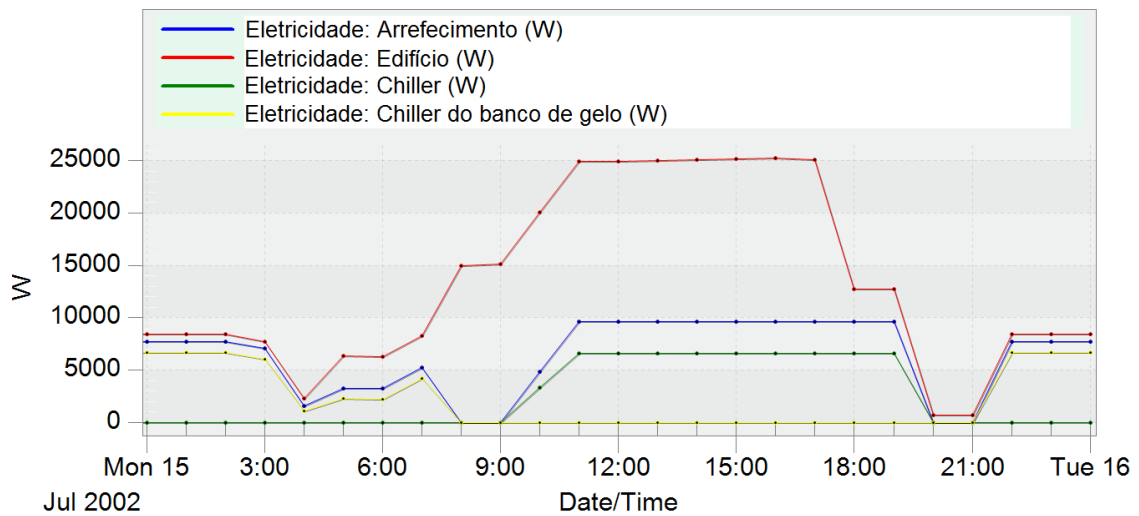
Figura 22 - Consumos energéticos ao longo do dia - Caso 1

Na Figura 22 é possível verificar que o consumo de eletricidade do chiller mantém-se relativamente constantes, apesar de a taxa de arrefecimento apresentar uma elevada amplitude de resultados (Figura 21). Este fator pode ser explicado pela variância do COP e da velocidade do caudal no chiller.

- **Caso 2 - Edifício com banco de gelo de apoio ao chiller principal**



**Figura 23 - Necessidade de arrefecimento ao longo do dia - Caso 2**



**Figura 24 - Consumos energéticos ao longo do dia - Caso 2**

Na Figura 23 já é possível verificar diferenças significativas comparadamente ao caso 1. O arrefecimento do edifício é partilhado de igual modo, pelo chiller principal e pela energia proveniente do banco de gelo. Isto permite ao chiller iniciar o seu funcionamento mais tarde quando comparado com a simulação inicial. A introdução do banco de gelo também permite ao chiller ter um consumo elétrico constante durante todo o seu funcionamento (Figura 24), pois o seu caudal mantém-se constante, cabendo ao banco de gelo alterar o seu caudal de modo a satisfazer as necessidades do edifício. Este caso é especialmente adequado para consumidores que procuram diminuir a potência contratada,

pois permite anular variações bruscas do consumo elétrico causadas pelas necessidades de arrefecimento.

De salientar também que a fração do banco de gelo disponível ao final do dia ser ainda bastante considerável, sugerindo um subaproveitamento do sistema.

- **Caso 3 - Edifício com banco de gelo de apoio ao chiller principal, evitando o uso do chiller em horas de ponta**

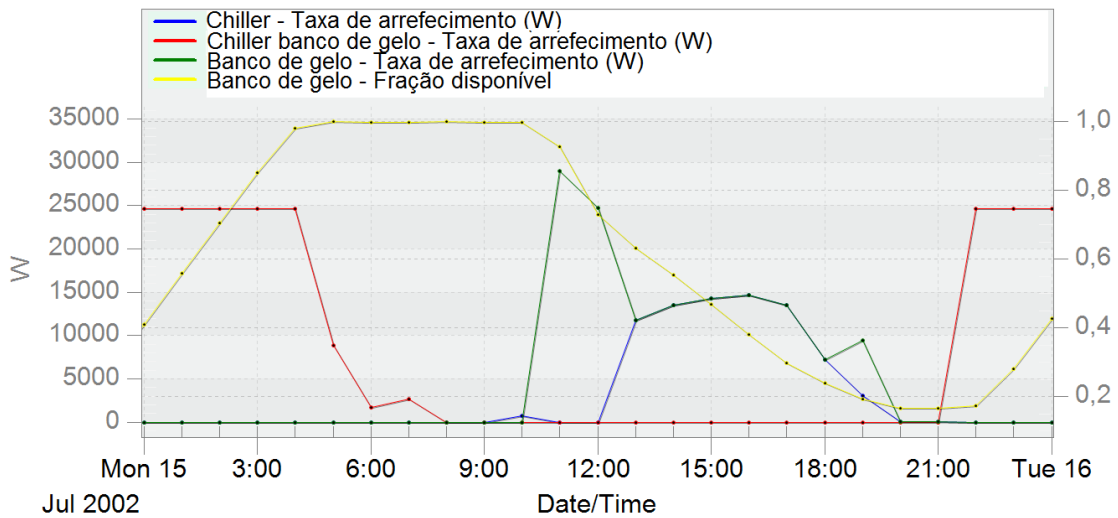


Figura 25 - Necessidade de arrefecimento ao longo do dia - Caso 3

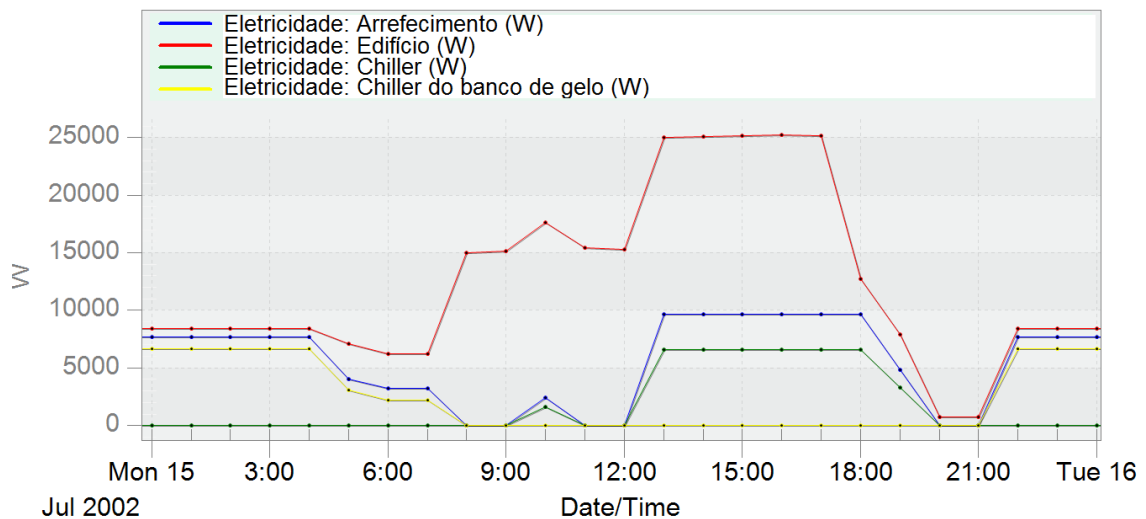


Figura 26 - Consumos energéticos ao longo do dia - Caso 3

O facto do chiller não entrar em funcionamento nas horas de ponta, leva a que a taxa de arrefecimento proveniente do banco de gelo seja bastante significativa nesse período, baixando de forma acentuada a energia disponível nesse sistema. Esta alteração permite retirar uma maior quantidade de energia ao banco de gelo. Se na simulação anterior, a fração mínima era ligeiramente inferior a 0,4, neste caso esse valor torna-se inferior a 0,2 (Figura 25).

Este caso também permitiu reduzir o número de horas onde é atingido o consumo máximo (Figura 26), sendo essa componente realizada no período onde o preço de eletricidade é maior.

- **Caso 4 - Edifício onde o banco de gelo tem prioridade sobre o chiller (*storage-priority*)**

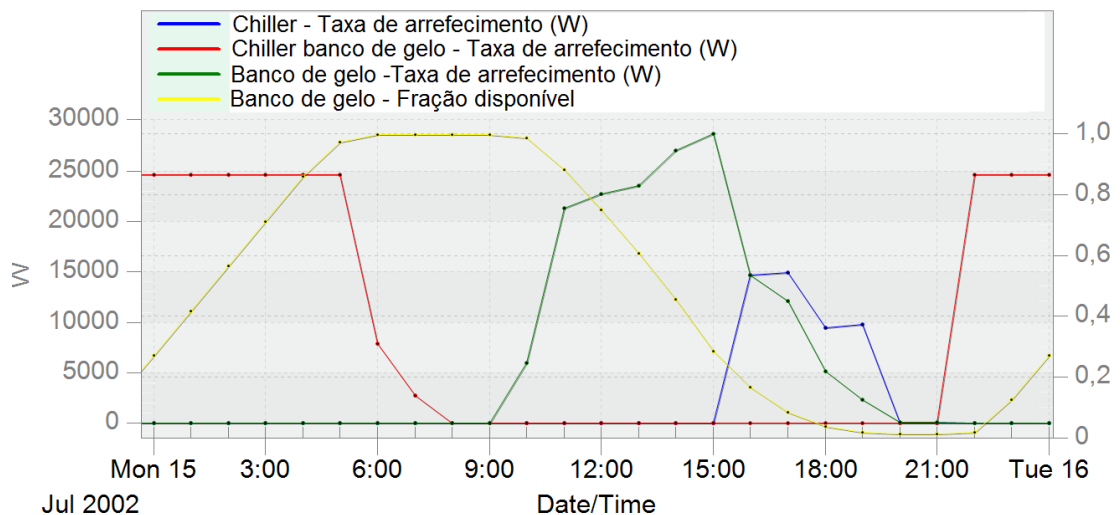


Figura 27 - Necessidade de arrefecimento ao longo do dia - Caso 4



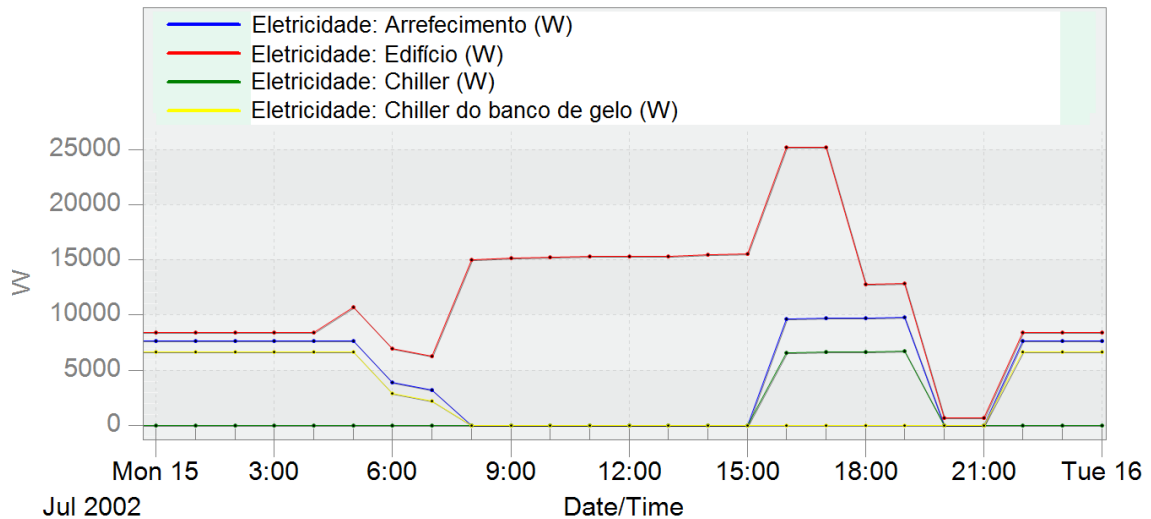


Figura 28 - Consumos energéticos ao longo do dia - Caso 4

Neste caso, toda a energia armazenada no banco de gelo é utilizada no processo de arrefecimento do edifício (Figura 27). Isto permite reduzir significativamente a eletricidade consumida nas primeiras horas de funcionamento. Esse fator é bem visível na Figura 28, pois permite ao chiller entrar em funcionamento somente a partir das 16:00h, ou seja, consegue anular todas as necessidades de arrefecimento até às 16:00h. Em dias de menor calor, é possível anular completamente a necessidade de utilização do chiller principal. Este fator torna-se ainda mais relevante devido ao facto do funcionamento do chiller se realizar em horas onde o preço de eletricidade é mais elevado.

- **Caso 5 - Edifício onde o banco de gelo tem prioridade sobre o chiller (*storage-priority*), evitando o uso do chiller em horas de ponta**

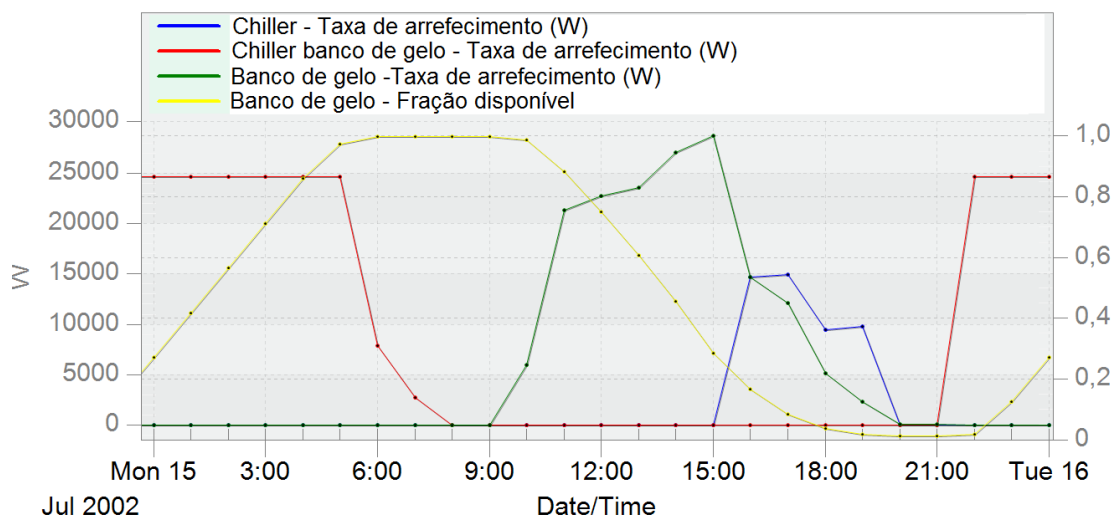


Figura 29 - Necessidade de arrefecimento ao longo do dia - Caso 5

Como é possível visualizar, a Figura 27 e 29 são iguais. Tal só ocorre porque a diferença entre o Caso 4 e Caso 5, é a utilização do Chiller até às 10:30h. Neste dia específico, as necessidades de arrefecimento apenas se iniciam às 10:30h, ou seja, não existe qualquer alteração comparadamente ao caso 4.

Na Tabela 13 é possível analisar todos os resultados para cada um dos casos para o *design day*.

**Tabela 13 - Consumos energéticos para o *design day* - todos os casos**

	Chiller	Chiller do banco de gelo	Total Chillers	Banco de gelo	Arrefecimento		Total	
Caso	Consumo (kWh)	Consumo (kWh)	Consumo (kWh)	Mínima fração disponível	Consumo (kWh)	Custo (€)	Consumo (kWh)	Custo (€)
1	105,06	-	105,06	-	150,76	24,60	325,08	55,22
2	62,77	49,27	112,04	0,364	150,48	22,23	325,55	52,93
3	51,21	54,28	105,49	0,176	139,10	16,34	314,35	47,12
4 e 5	26,67	58,60	85,27	0,012	139,10	12,14	282,58	42,84

Na Tabela 14 estão apresentados os resultados para o período do horário de verão (25 de Março até 25 de Outubro).

**Tabela 14 - Consumos energéticos para o horário de verão - todos os casos**

	Chiller		Chiller do banco de gelo	Total Chillers	Arrefecimento		Total	
Caso	Consumo (kWh)	Potência máxima (W)	Consumo (kWh)	Consumo (kWh)	Consumo (kWh)	Custo (€)	Consumo (kWh)	Custo (€)
1	20 133	18 825	-	20 176	28 711	4 864	68 180	11 642
2	11 541	18 404	8 906	20 447	27 345	3 930	67 166	10 759
3	10 003	22 072	9 505	19 508	25 650	3 045	65 489	9 878
4	5 081	21 263	10 206	15 286	19 145	2 227	5 8970	9 056
5	5 119	19 469	10 213	15 332	19 214	2 230	59 038	9 058

Da Tabela 14 é possível retirar várias conclusões sobre a implementação de um banco de gelo num sistema de climatização. O caso 1 serve de referência para a análise dos restantes casos.

No caso 2 é possível verificar que apesar do consumo das necessidades de arrefecimento terem diminuído ligeiramente (comparadamente ao primeiro caso), o custo associado a este é bastante menor. Isto só é possível devido à utilização de um tarifário tri-horário, conjugado com o banco de gelo. Foi possível armazenar energia térmica durante a noite, quando o preço da eletricidade é menor, para que fosse usado durante o dia quando o

preço é maior. Este processo verifica-se eficiente em termos energético e interessante em termos financeiramente. Contudo, como é possível verificar na Tabela 13, não foi explorado todo potencial desta técnica. É possível verificar que a fração mínima que o banco de gelo atingiu, no *design day*, foi de 0,365, ou seja, 36,5% da energia armazenada não foi utilizada. O banco de gelo possui uma capacidade máxima de 0,6 GJ, logo 0,219 GJ (60,83 kWh) de energia não foi explorada da forma mais vantajosa. Num dia em que o consumo total de arrefecimento é de 169,79, a parcela não utilizada poderia ter diminuído substancialmente o consumo energético do edifício.

No caso 3, a falha apresentada no caso 2 é reduzida substancialmente. Isto deve-se ao facto de se suprimir o uso do chiller em certas horas do dia, obrigando a uma maior utilização da energia proveniente do banco de gelo. Como as horas em que o chiller foi suprimido, correspondem às horas de ponta, onde o preço da eletricidade é extremamente alto, os ganhos financeiros foram consideráveis (comparadamente ao caso 1). Se em termos energéticos a redução foi de 10,8%, em termos monetários, a redução foi de 37,5%.

O caso 4 e 5 são muito semelhantes, portanto é normal que os resultados obtidos sejam também eles bastante idênticos. Verificou-se no entanto que, a utilização do chiller durante as primeiras horas do dia, permite uma redução no tamanho do chiller, mas aumenta ligeiramente o consumo energético e o seu custo.

Um aspeto interessante dos resultados obtidos, é o facto de ser possível verificar que conforme a utilização do chiller principal diminui, a energia necessária para realizar o arrefecimento também diminui. Isto significa que a utilização do chiller principal é menos eficiente do que a utilização do chiller do banco de gelo. Isto não devia ocorrer, pois a temperatura de saída do chiller é 7,22 °C, e a do chiller do banco de gelo -5 °C. Apesar das temperaturas noturnas serem inferiores, comparadamente com as diurnas, a diferença entre a temperatura máxima e a mínima nunca é de tal maneira expressiva como a diferença de temperatura à saída dos chillers. O motivo disso acontecer está ilustrado na Figura 30. O chiller apresenta consumos regulares em torno dos 6600 W, porém nos períodos de maior calor, a potência requerida para satisfazer as necessidades de arrefecimento mais que duplicam. Como o chiller é dimensionado de modo a satisfazer todas as necessidades de arrefecimento do edifício, o seu cumprimento torna o chiller sobredimensionado para o uso “normal”, influenciado negativamente o seu COP.

Esta simulação pode parecer improvável que aconteça numa situação real, contudo através de um estudo efetuado, no Reino Unido, a 50 sistemas de AVAC, verificou-se que 100% dos chillers estavam sobredimensionados, ou seja, todos os chillers observados tinham capacidades superiores às necessárias [81]. Este facto é muitas vezes utilizado pelos comercializadores de bancos de gelo para afirmar que a introdução dos bancos permite reduzir os consumos energéticos do edifício.

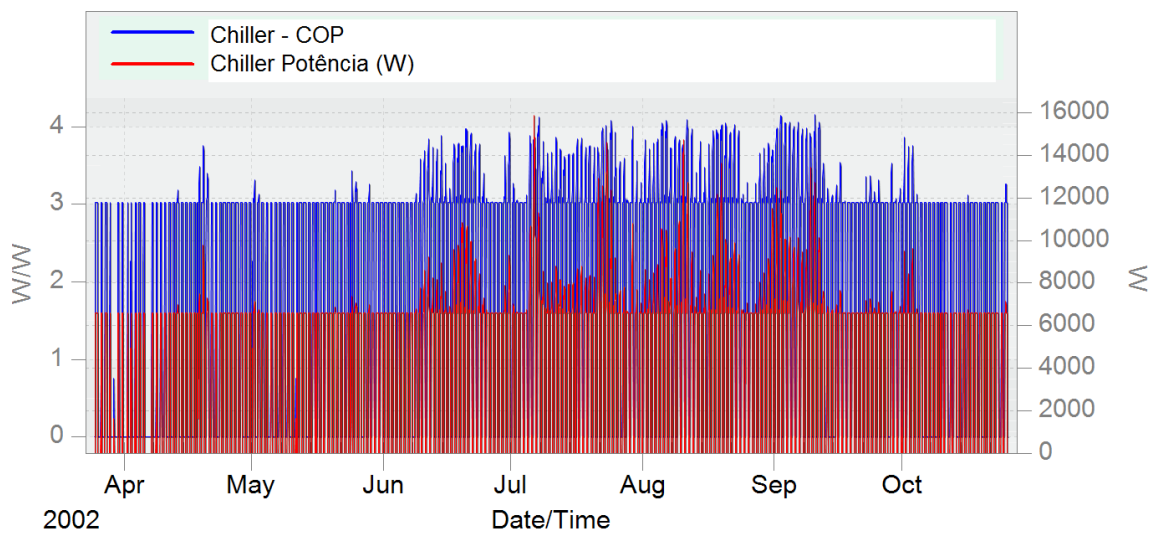


Figura 30 - Chiller: Potência e COP – Caso 1

### 3.1.1.1 Otimizações realizadas à instalação inicial

Como foi verificado, o chiller não apresenta um funcionamento adequado pois está sobredimensionado para uso diário habitual. Uma das soluções possível é a divisão do chiller em dois de menor potência. Isto permitiria que um dos chillers funciona-se eficientemente, sendo o outro unicamente acionado quando as necessidades de arrefecimento assim o exigiam. Contudo, para os casos onde exista um banco de gelo, o próprio banco de gelo pode tomar o lugar do chiller secundário.

Desta forma foram realizadas otimizações aos casos de estudo, de modo a ser possível retirar melhores resultados das simulações dinâmicas.

- **Caso 1 - Edifício sem banco de gelo**

Ao sistema apresentado anteriormente foi-lhe inserido um novo chiller em paralelo com o já existente. Foram também introduzidas novas características ao chiller principal. O chiller, que era auto-dimensionado, passou a possuir uma capacidade de arrefecimento de 30 kW. Já o chiller secundário tem uma capacidade de 25 kW.

Se voltamos a verificar os consumos instantâneos e o seu COP ao longo da simulação, é possível verificar a diminuição substancial do seu consumo e o melhoramento generalizado do COP (Figura 31). O COP continua reduzido nos períodos com menores necessidades de arrefecimento, porém possui um desempenho elevado e constante durante o período de maior calor exterior.

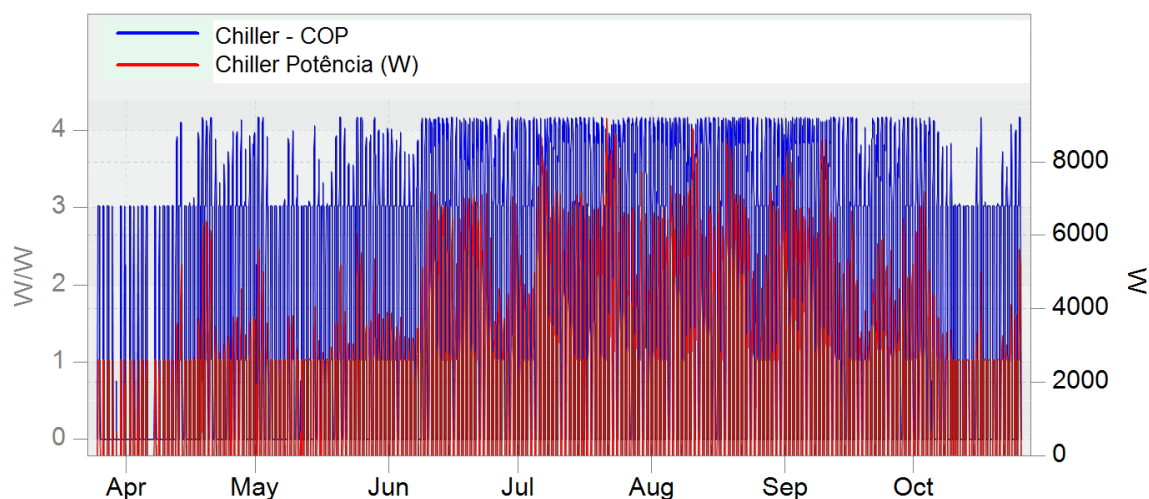


Figura 31 - Chiller principal: Potência e COP – Caso 1 otimizado

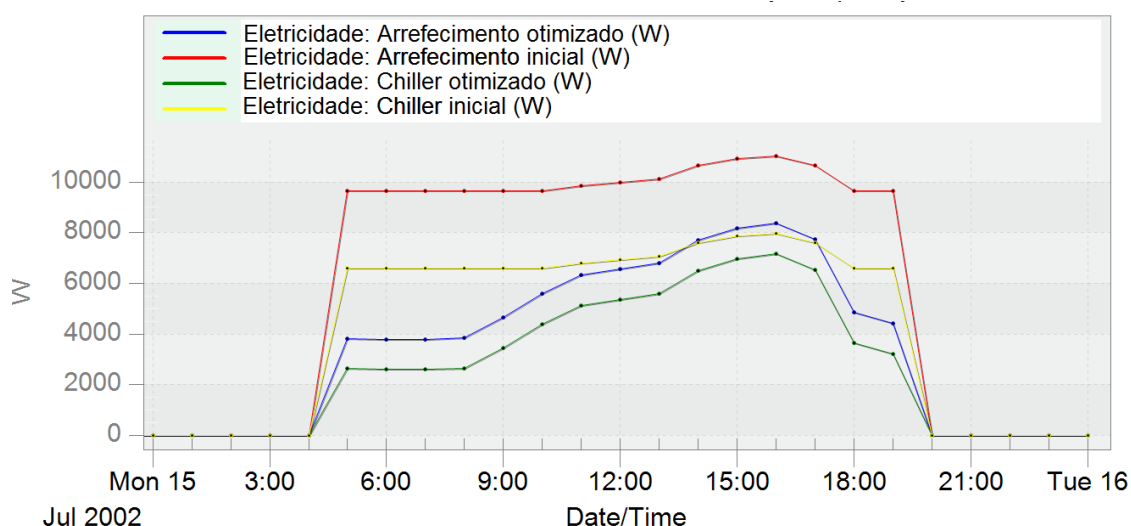


Figura 32 - Consumos energéticos ao longo do dia, antes e depois de ser otimizado – Caso 1

Na Figura 32 é possível comparar os consumos para o caso inicial e o otimizado. O consumo de eletricidade regista uma acentuada redução, sendo uma das diferenças visíveis, o facto de o consumo do chiller deixar de ser constante para se assemelhar à curva da taxa de arrefecimento.

Na Tabela 15 estão representados os consumos e o custo associado a cada simulação. A otimização realizada permite utilizador obter uma poupança energética de 65,56 kWh (20,10%) e 10,21 € (18,49%) somente num dia de verão. Esta análise realça a importância do dimensionamento correto dos sistemas de climatização.

Nos casos seguintes, não será esperado uma redução desta dimensão tanto no consumo como no custo, isto deve-se ao facto da utilização do chiller principal ser inferior nesses casos.

Tabela 15 - Consumos energéticos para o *design day*, antes e depois de ser otimizado – Caso 1

Modo	Chiller	Chiller Secundário	Arrefecimento		Total	
	Consumo (kWh)	Consumo (kWh)	Consumo (kWh)	Custo (€)	Consumo (kWh)	Custo (€)
Inicial	105,06	-	150,76	24,60	325,08	55,22
Otimizado	68,49	0	86,49	14,58	259,72	45,01

- **Caso 2 - Edifício com banco de gelo de apoio ao chiller principal**

Na primeira simulação efetuada para o *design day*, foi possível verificar que o valor mínimo de energia disponível no banco de gelo ainda era considerável. Deste modo, para retirar um maior proveito dessa energia, a única melhoria apresentada para este caso foi a troca do chiller auto-dimensionado por um com capacidade de 30 kW.

Verificou-se que também que nos dois dias mais quentes do ano, não se cumpriu com os requisitos térmicos definidos. Foi atingida uma temperatura interior de 26.1 °C e 25,5 °C, em vez dos 25 °C exigidos. Como se tratou unicamente de dois dias, e sendo os valores da temperatura pouco superiores aos desejados, considerou-se os valores obtidos como válidos.

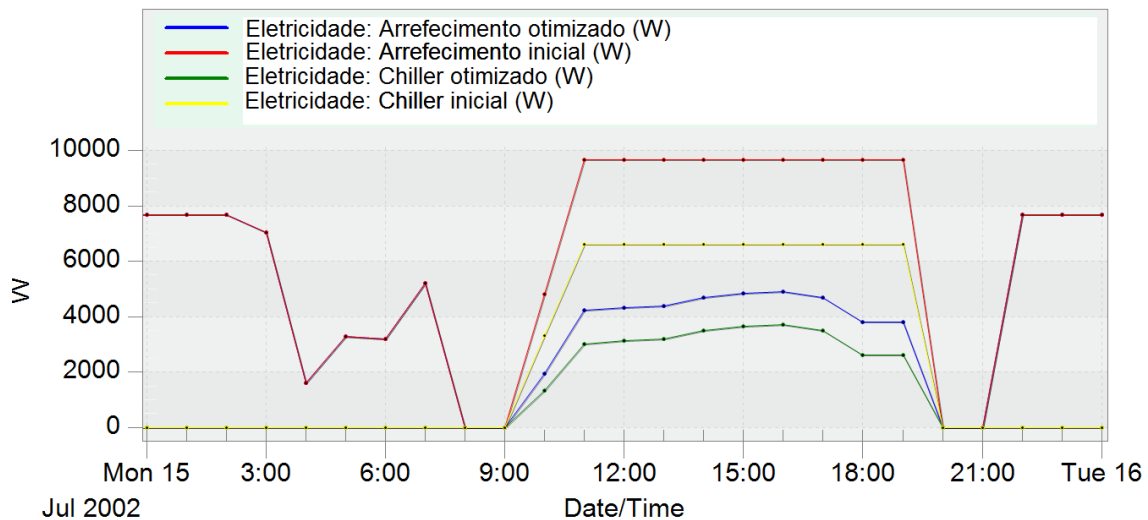


Figura 33 - Consumos energéticos ao longo do dia, antes e depois de ser otimizado – Caso 2

Os resultados obtidos neste caso vão de encontro ao verificado no caso anterior. O chiller deixa de deter um consumo constante e passa para um consumo que varia de igual forma à taxa de arrefecimento (Figura 33). Porém, neste caso a variância do consumo é

menor. Isto deve-se ao facto do banco de gelo servir de apoio ao chiller, e deste modo, diminuir grandes discrepâncias de consumo que possam ocorrer.

Na Tabela 16 é possível observar uma redução de 50,1 kWh (15,39%) do consumo e 9,56 € (18,06%) do custo. Como foi mencionado no caso 1, a redução do consumo de energia e do custo são menos significativas que o anterior. Porém, quando os valores são traduzidos para as respetivas percentagens, é possível verificar que o custo detém uma percentagem semelhante ao caso 1, enquanto que no consumo o valor é bastante inferior. A diferença no consumo é explicada pela reduzida utilização do chiller principal, logo terá sempre um relevo menor no consumo total do edifício. O custo é explicado pela utilização de um chiller secundário no período noturno, onde o preço é mais vantajoso, permitindo maiores poupanças.

Um dos objetivos deste caso otimizado, seria tentar retirar uma maior quantidade de energia do banco do gelo, porém esse fator não é visível no dia de estudo. Isto deve-se ao facto da potência do chiller ser suficiente para satisfazer as necessidades de arrefecimento do edifício, não sendo necessário recorrer ao banco do gelo.

**Tabela 16 - Consumos energéticos para o *design day*, antes e depois de ser otimizado – Caso 2.**

Modo	Chiller	Chiller do banco de gelo	Banco de gelo	Arrefecimento		Total	
	Consumo (kWh)	Consumo (kWh)	Mínima fração disponível	Consumo (kWh)	Custo (€)	Consumo (kWh)	Custo (€)
Inicial	62,77	49,27	0,364	150,48	22,23	325,55	52,93
Otimizado	30,21	49,27	0,364	100,38	12,67	275,45	43,37

- **Caso 3 - Edifício com banco de gelo de apoio ao chiller principal, evitando o uso do chiller em horas de ponta**

Tal como nos casos anteriores, a capacidade do chiller principal foi alterada para 30 kW. Para além disso, na Tabela 14 é possível verificar que foi nesta simulação que foi atingido a potência máxima para o chiller. Isto deve-se ao facto da utilização do chiller ser suspensa na hora de ponta, o que leva ao uso acelerado da energia proveniente do banco de gelo. Em dias de maior calor, o banco de gelo é rapidamente descarregado, impedindo o apoio ao chiller principal nas restantes horas. Deste modo, também foi aumentado a capacidade do chiller para 0,9 GJ. Para que seja possível recarregar o banco de gelo, foi aumentado a capacidade do chiller de carga para 30 kW.

Neste caso, tal como no anterior, existiram dois dias onde não foram cumpridos os *setpoints* de temperatura exigidos.

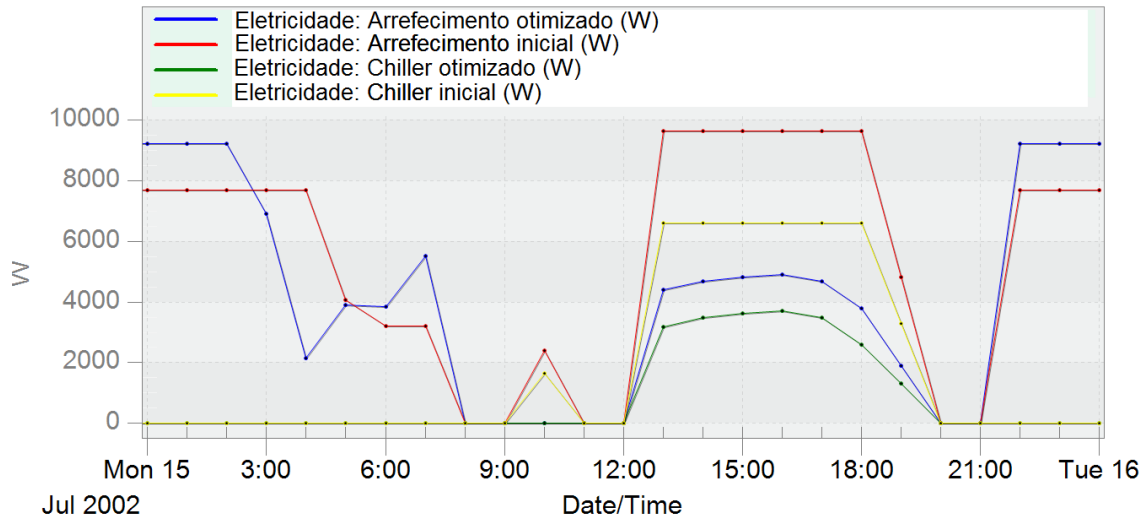


Figura 34 - Consumos energéticos ao longo do dia, antes e depois de ser otimizado – Caso 3

Como este caso é originário do caso 2, as curvas de consumo são idênticas às apresentadas anteriormente. A exceção reside no facto de as necessidades de arrefecimento serem nulas nas horas de ponta. Também é possível verificar o impacto da alteração do chiller de carregamento de 25 kWh para 30 kWh (Figura 34).

Para este caso em particular, o banco do gelo atinge a capacidade máxima bastante mais cedo do que no caso inicial. Apesar do banco de gelo deter uma maior capacidade de armazenamento, as vantagens de o possuir, só se tornam visíveis depois de descarregar os primeiros 0,6 GJ, correspondentes à capacidade do banco de gelo no caso 2. Caso não ocorra, o banco de gelo estará sempre carregado (totalmente) antes que o caso anterior, podendo levar a consumo suplementares de modo a manter carregado até à hora de funcionamento.

Na simulação otimizada é possível reduzir o consumo em 31,96 kWh (10,49%) e o custo em 4,98 € (11,23%) (Tabela 17). Os resultados vão de encontro ao que foi dito nos casos anteriores. A redução do custo apresenta uma percentagem menor devido ao facto de no caso inicial já se proibir o uso do chiller nas horas de ponta onde o preço é o mais elevado.

Tabela 17 - Consumos energéticos para o *design day*, antes e depois de ser otimizado – Caso 3

Modo	Chiller	Chiller do banco de gelo	Banco de gelo	Arrefecimento		Total	
	Consumo (kWh)	Consumo (kWh)	Mínima fração disponível	Consumo (kWh)	Custo (€)	Consumo (kWh)	Custo (€)
Inicial	44,60	54,28	0,166	129,44	14,93	304,69	44,34
Otimizado	21,42	57,36	0,456	97,68	10,00	272,73	39,36



- **Caso 4 - Edifício onde o banco de gelo tem prioridade sobre o chiller (*storage-priority*)**

Neste caso optou-se por uma nova abordagem. Foi realizada uma tentativa de anular completamente as necessidades de utilização do chiller principal. Para isso, foi necessário ampliar a capacidade do banco de gelo para 1,2 GJ. A capacidade de arrefecimento do chiller do banco de gelo foi alterado para 45 kW e o chiller principal para 25 kW.

Neste caso, só durante 15 min em Julho (25,71 °C) é que não foram cumpridos os setpoint de temperatura.

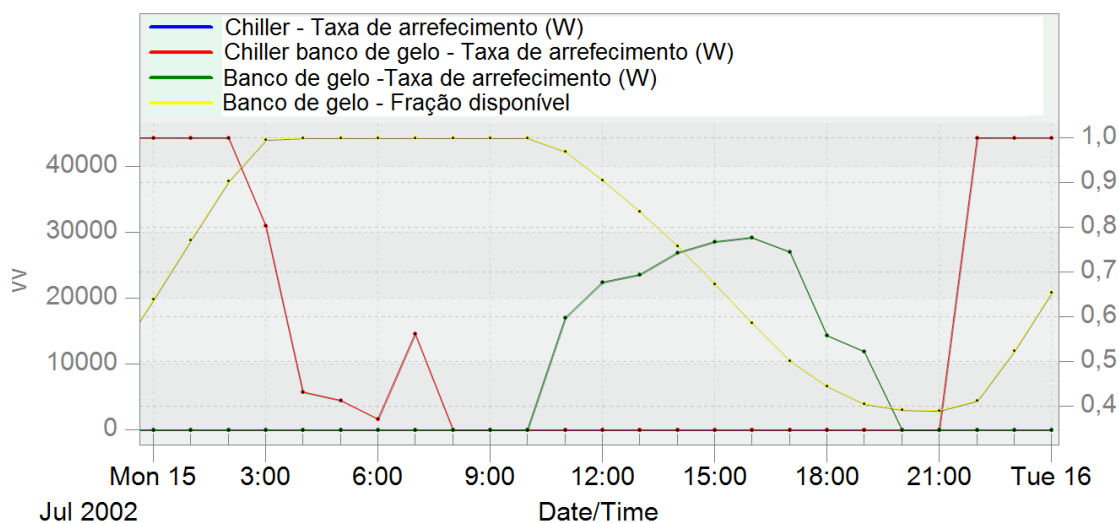


Figura 35 - Necessidade de arrefecimento ao longo do dia, para o caso otimizado - Caso 4

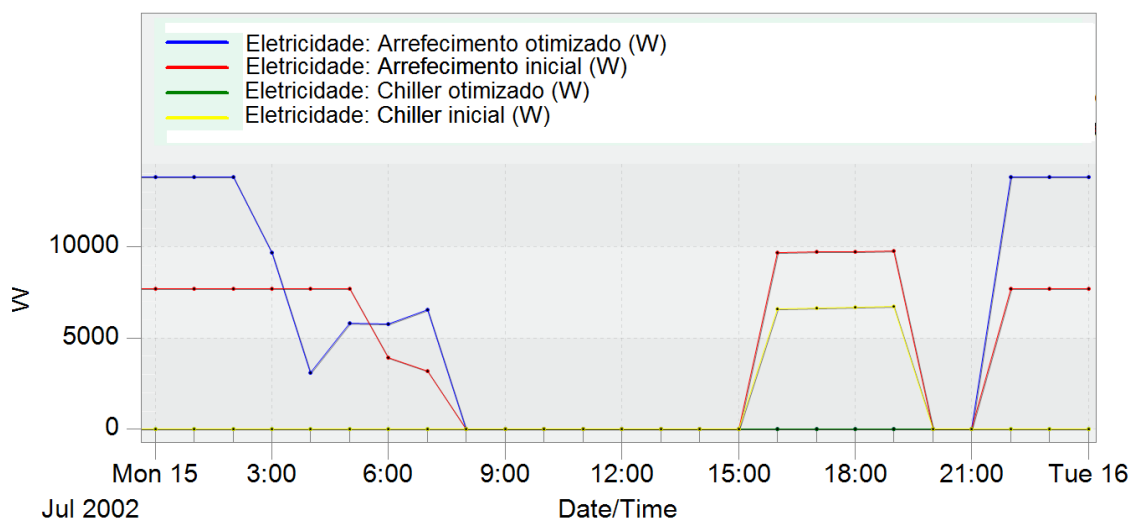


Figura 36 - Consumos energéticos ao longo do dia, antes e depois de ser otimizado - Caso 4

Ao contrário do que acontecia no caso inicial, o banco de gelo não foi completamente descarregado (Figura 35). Este fator é essencial para anular completamente as necessidades de arrefecimento nas fora das horas de vazio. Como a capacidade do chiller do banco de gelo é elevada, quando o banco de gelo não é descarregado completamente, no dia seguinte este atinge a sua capacidade máxima rapidamente (tal como no caso 3). Também é visível que apesar do banco estar completamente carregado às 7:00h, o chiller entra novamente em funcionamento (Figura 36). Tal acontece devido à subida de temperatura na saída do chiller, que pode levar a uma perda de energia armazenada no banco de gelo devido à diferença de temperatura entre este e os tubos do circuito.

Na Figura 36 também são visíveis as diferenças da solução inicial e otimizada. Apesar da energia consumida com o chiller do banco de gelo aumentar drasticamente, é possível anular completamente as necessidades de arrefecimento durante o período onde o preço da energia é desfavorável.

O aumento do consumo do chiller durante o período noturno explica a reduzida poupança obtida, sendo 7,43 kWh (2,63%) no consumo e de 3,8 € (8,87%) no custo total (Tabela 18). Neste caso, quanto maior forem as necessidades de arrefecimento, maior será a poupança possível, pois o potencial desta solução reside na energia armazenada no banco de gelo. Este modelo é especialmente adequado para os dias de maior calor, pois se a sua utilização for reduzida, a poupança também o será.

**Tabela 18 - Consumos energéticos para o *design day*, antes e depois de ser otimizado – Caso 4**

Modo	Chiller	Chiller do banco de gelo	Banco de gelo	Arrefecimento		Total	
	Consumo (kWh)	Consumo (kWh)	Mínima fração disponível	Consumo (kWh)	Custo (€)	Consumo (kWh)	Custo (€)
Inicial	26,67	58,60	0,012	107,46	12,14	282,58	42,84
Otimizado	0	83,43	0,390	100,08	8,35	275,15	39,04

- **Caso 5 - Edifício onde o banco de gelo tem prioridade sobre o chiller (*storage-priority*), evitando o uso do chiller em horas de ponta**

Como neste caso o chiller principal está em funcionamento até as 10:30h, o banco de gelo não necessita de ter as mesmas dimensões do caso 4. Deste modo, foi utilizado um banco de gelo de 0,9 GJ e a capacidade do chiller do banco do gelo foi modificada para 35 kW, e a do chiller principal para 25 kW.

Tal como nos casos anteriores, em dois dias de verão a temperatura interior esteve ligeiramente acima dos 25 °C desejados.

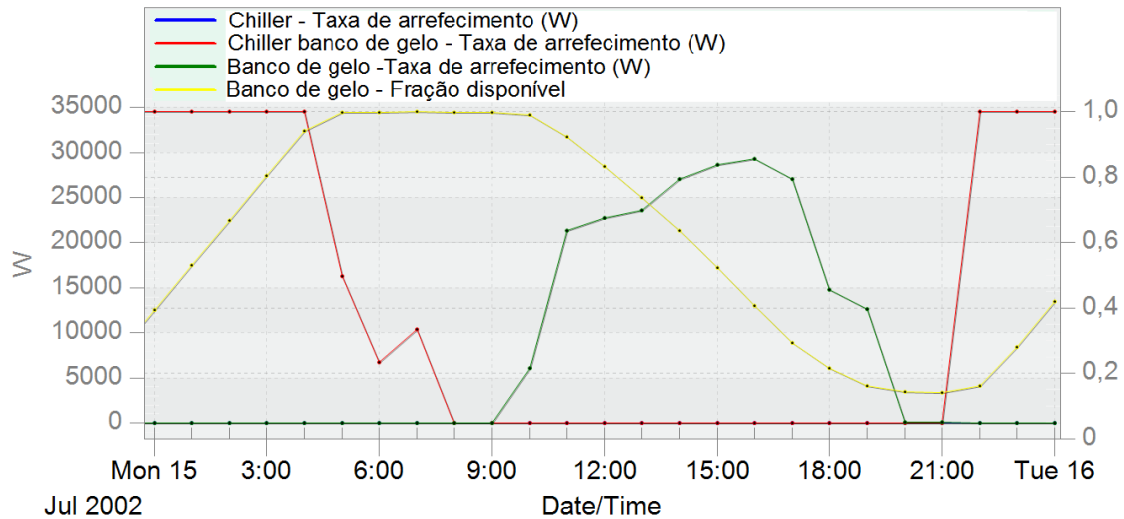


Figura 37 - Necessidade de arrefecimento ao longo do dia, para o caso otimizado - Caso 5

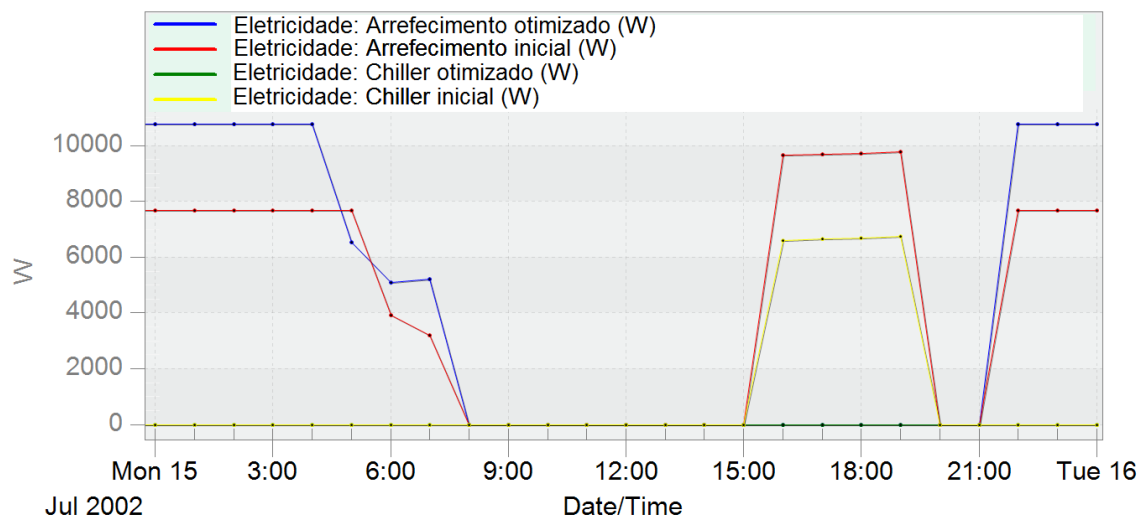


Figura 38 - Consumos energéticos ao longo do dia, antes e depois de ser otimizado - Caso 5

Este caso é bastante semelhante ao apresentado anteriormente. Porém neste caso o banco de gelo é menor, sendo o chiller de carregamento também menor, permitindo assim um consumo menor (Figura 38). Se o caso anterior é especialmente adequado para dias de maior calor, este é o mais adequado para ser usado na generalidade dos dias, pois é possível retirar uma grande percentagem da energia armazenada no banco de gelo. Neste dia específico é utilizado 85,8% da energia disponível (Figura 37 e Tabela 19).

A solução otimizada permite uma redução de 15,29 kWh (5,41%) no consumo e 4,45 € (10,39%) no custo (Tabela 19). Estes valores são superiores ao caso anterior apesar dos gráficos serem bastante idênticos. Isto deve-se essencialmente à diminuição da capacidade do chiller.

**Tabela 19 - Consumos energéticos para o *design day*, antes e depois de ser otimizado – Caso 5**

Modo	Chiller	Chiller do banco de gelo	Banco de gelo	Arrefecimento		Total	
	Consumo (kWh)	Consumo (kWh)	Mínima fração disponível	Consumo (kWh)	Custo (€)	Consumo (kWh)	Custo (€)
Inicial	26,67	58,60	0,012	107,46	12,14	282,58	42,84
Otimizado	0	78,16	0,142	92,16	7,69	267,29	38,39

Na Tabela 20 estão demonstradas todas as alterações efetuadas aos componentes do sistema de climatização.

Usou-se como pressuposto inicial o facto do banco de gelo funcionar unicamente no horário de verão. Esta solução é facilmente explicada pela ausência da necessidade de arrefecimento no horário de inverno. Seria um desperdício de energia se o banco de gelo tivesse em funcionamento durante o inverno, pois para manter o banco de gelo sempre cheio seria necessário ativar periodicamente o chiller, sem que no entanto houvesse uma utilização da energia armazenada. Porém não é possível garantir que não existam necessidades de arrefecimento nesse período. Deste modo existe sempre um dos chillers disponíveis para satisfazer essas necessidades. Somente o caso 3 não apresenta pelo menos um chiller de 25 kWh. Sendo assim, é expectável que os consumos para o horário de Inverno sejam maiores no caso 3 do que nos restantes. Porém, as necessidades de arrefecimento nesse período são de tal modo reduzidas que a diferença no custo seria insignificante.

**Tabela 20 - Alteração efectuada aos casos estudados**

	Chiller principal – Potência (kW)		Chiller do bando de gelo/secundário – Potência (kW)		Banco de gelo – Capacidade (GJ)	
	Inicial	Otimizado	Inicial	Otimizado	Inicial	Otimizado
1	Auto-dimensionado	30	-	25	-	.
2	Auto-dimensionado	30	25	25	0,6	0,6
3	Auto-dimensionado	30	25	30	0,6	0,9
4	Auto-dimensionado	25	25	45	0,6	1,2
5	Auto-dimensionado	25	25	35	0,6	0,9

Tabela 21 - Consumos energéticos para o *design day*, otimizado - todos os casos

Caso	Chiller	Chiller do banco de gelo/ Secundário	Total Chillers	Banco de gelo	Arrefecimento		Total		
	Consumo (kWh)	Consumo (kWh)	Consumo (kWh)	Mínima fração disponível	Consumo (kWh)	Custo (€)	Consumo (kWh)	Custo (€)	€/ kWh
1	68,49	0	68,49	-	86,49	14,58	259,72	45,01	0,173
2	30,21	49,27	79,48	0,364	100,38	12,67	275,45	43,37	0,157
3	21,42	57,36	78,78	0,456	97,68	10,00	272,73	39,36	0,144
4	0	83,43	83,43	0,390	100,08	8,35	275,15	39,04	0,142
5	0	78,16	78,16	0,142	92,16	7,69	267,29	38,39	0,144

Na Tabela 21 estão representados todos os valores obtidos pela simulação dinâmica realizada para o *design day*.

Como seria de esperar, o menor consumo de energia foi verificado no caso 1, contudo este apresenta o maior custo monetário. É claramente visível a importância que um banco de gelo pode ter em termos económicos. Se verificamos o preço da energia por cada kWh utilizado, é possível verificar que no primeiro caso, esse valor é o mais elevado, sendo o mais baixo visível no caso 4. Isto só acontece devido ao deslocamento da energia necessária para satisfazer as necessidades de arrefecimento, do período diurno para o período noturno, onde o preço é mais baixo.

Apesar do caso 4 apresentar o menor relação custo/consumo, o menor custo total é verificado no caso 5. Tal deve-se ao facto do caso 4 deter um maior consumo nas horas de vazio, que por sua vez, baixa a relação custo/consumo.

Os casos 2 e 4 são os que exibem os maiores consumos de eletricidade, sendo os dois bastante idênticos, porém o preço é bastante diferente. Apesar dos dois modelos possuírem um banco de gelo, o caso 2 necessita de utilizar o chiller principal para satisfazer as necessidades de arrefecimento.

É também importante salientar que a fração de energia mínima disponível no banco de gelo no caso 2, 3 e 4 ser ainda significativa, representando energia produzida mas não utilizada. Logo, dias onde seja utilizado uma maior parcela da energia armazenada, pode apresentar resultados mais favoráveis do que os estudados.

**Tabela 22 - Consumos elétrico dos chillers no horário de verão, otimizado - todos os casos**

	Chiller	Chiller do banco de gelo/ Secundário	Total Chillers
Caso	Consumo (kWh)	Consumo (kWh)	Consumo (kWh)
1	11138,88	1469,87	12608,75
2	5983,54	8926,11	14909,65
3	4470,50	10596,08	15066,58
4	856,46	14963,96	15820,42
5	1865,72	12824,59	14690,31

Como já foi visto anteriormente no Caso 2 (Figura 23), o banco de gelo serve de apoio ao chiller principal e estes apresentam taxas de arrefecimento idênticas. Porém na Tabela 22 é possível verificar que o consumo do chiller do banco de gelo é maior que o do chiller principal, apesar de este possuir uma capacidade de arrefecimento maior e consequentemente consumos instantâneos mais elevados. Este é o grande problema da implementação de um banco de gelo num sistema de climatização, pois é necessário utilizar mais energia para reproduzir a mesma taxa de arrefecimento de um chiller normal.

**Tabela 23 - Consumos energéticos para o horário de verão, otimizado - todos os casos**

	Arrefecimento		Total			Em relação ao caso 1	
Caso	Consumo (kWh)	Custo (€)	Consumo (kWh)	Custo (€)	€/ kWh	Consumo (%)	Custo (%)
1	16376,28	2816,73	55847,77	9594,95	0,172	-	-
2	18658,10	2353,30	58500,44	9185,95	0,157	+ 4,7	- 4,3
3	18647,29	1937,85	58503,10	8774,48	0,150	+ 4,8	- 8,6
4	19033,12	1703,46	58870,04	8535,41	0,145	+ 5,4	- 11,0
5	17560,21	1681,86	57421,90	8517,57	0,148	+ 2,8	- 11,2

Da Tabela 23 é possível retirar as conclusões finais sobre a viabilidade da implementação de um banco de gelo no sistema de climatização.

Tal como na análise realizada para o *design day*, o caso 1 apresenta o menor consumo de energia, porém o maior custo total.

No caso 1 e 2, o preço da energia por cada kWh utilizado, é idêntico ao verificado na simulação do *design day*. No entanto, para os restantes casos foi registado um aumento desta relação. Isto demonstra que a implementação destes sistemas, para períodos onde as necessidades de arrefecimento são menores, podem não traduzir nas mesmas poupanças registadas na simulação do dia de estudo. O caso 3 foi o que apresentou a maior subida, devendo-se essencialmente à maior capacidade do chiller do banco de gelo, pois em dias de pouca utilização o seu uso torna-se pouco eficiente.

Tal como se pressupôs, após a obtenção dos resultados iniciais, fica comprovado que a implementação de um banco de gelo no sistema, permite reduzir significativamente os custos associados à climatização, porém os consumos de eletricidade serão sempre maiores.

O caso 5 apresenta o melhor resultado, sendo possível reduzir os custos em 1077,38 € anuais.

Aos dados apresentados, falta inserir o custo associado à potência contratada à rede. Como é possível verificar na Tabela 24, existem consumos máximos que estão ligeiramente acima do contratado. Isto obrigaria a que a potência contratada subisse para o próximo escalão, tornando a instalação mais cara. Como estas potências representam unicamente duas ou três situações momentâneas, onde a junção destes momentos nem representam uma hora na simulação, optou-se pela utilização da potência do escalão inferior, sendo representada pelos valores entre parênteses. A simulação possui a duração de 215 dias.

Com a introdução do custo associado à potência contratada, é verificado que o caso 4 representa a melhor solução, ultrapassando ligeiramente o caso 5. É possível registrar uma poupança económica de 1133,97 € para o horário de verão. Se considerarmos que para o horário de inverno o consumo é igual em todos os casos, à poupança registada é possível obter um acréscimo de 51,93 € nos casos 2, 3 e 4.

**Tabela 24 - Custo da potência contratada – todos os casos**

Caso	Consumo Máximo (kW)	Potência contratada (kVA)	Custo diário (€/dia)	Custo da potência contratada (€)	Custo total (€)
1	34,64	41,4 (34,5)	2,0975 (1,7514)	376,55	9971,50
2	28,89	34,5 (27,6)	1,7514 (1,4052)	302,12	9488,07
3	27,56	27,6	1,4052	302,12	9076,60
4	28,66	34,5 (27,6)	1,7514 (1,4052)	302,12	8837,53
5	38,75	41,4 (34,5)	2,0975 (1,7514)	376,55	8894,12

Apesar de nenhum tarifário permitir a utilização de uma tarifa simples para potências contratadas superiores a 20,7 kVA, seria interessante verificar se a sua utilização traria maiores benefícios do que a tarifa tri-horária. Deste modo, recorrendo à informação disponível na página da ERSE para o tarifário selecionado [72], é retirado o valor de 0,1586 €/kWh para potências contratadas entre 10,35 kVA e 20,7 kVA.

É verificado que a possibilidade de utilização da tarifa simples seria extremamente atraente, pois possui custos semelhantes aos apresentados no melhor caso da tarifa tri-horária (Tabela 25). Nesta situação era anulado a vantagem da utilização noturna de eletricidade, tornando a instalação de bancos de gelo extremamente ineficiente. O caso 4, na tarifa tri-horária, continuaria a ser a mais económica, pois a potência contratada continuaria a ser maior no caso 1, contudo os ganhos obtidos muito dificilmente

justificariam o investimento realizado nos bancos de gelo. Assim sendo, não é aconselhado a sua utilização caso a potência contratada seja inferior a 20,7 kVA.

**Tabela 25 - Custo para a tarifa simples e tri-horária**

Caso	Consumo (kWh)	Tarifa tri-horária	Tarifa simples
		Custo (€)	Custo (€)
1	55847,77	9594,95	8857,46
2	58500,44	9185,95	9278,17
3	58503,10	8774,48	9278,59
4	58870,04	8535,41	9336,79
5	57421,90	8517,57	9107,11

### 3.1.2 Aplicação dos sistemas de energia renovável

Em seguida serão apresentados os valores de produção de energia proveniente das soluções de energia renovável (energia eólica e solar) e o seu impacto no consumo elétrico do edifício para os casos otimizados. Será utilizada uma estratégia de autoconsumo, sendo o excedente vendido à rede.

Como a curva de produção de energia elétrica é idêntico à de necessidades de eletricidade do edifício, o autoconsumo permite reduzir significativamente a energia comprada à rede e anular os consumos de pico verificados na instalação. Teoricamente, este fator permitiria reduzir significativamente a potência contratada à rede. Porém, a legislação em vigor sobre o autoconsumo refere que a potência do sistema de energia renovável não pode ser superior à potência contratada. O nosso sistema instalado possui uma potência de 83,6 kW (48,6 kW + 35 kW), que ultrapassa largamente o limite de potência contratada (41,4 kW) para o tarifário selecionado. Seria então necessário haver um acordo entre o fornecedor de energia e utilizador, de modo a estudar a implementação deste sistema sem elevados custos acrescidos. Por este motivo, neste estudo, será ignorado o custo associado à potência contratada já que seria igual para todos eles.

Serão apresentados três dias consecutivos de modo a entender, de uma melhor forma, a importância das condições climáticas no consumo e produção de eletricidade.

Na Figura 39 é possível visualizar a produção de energia elétrica proveniente dos sistemas de energia renovável. É claramente visível a intermitência dos dois sistemas, porém no solar é possível verificar um padrão de produção. Tal permite aos utilizadores, caso seja desejado, adaptar o consumo elétrico para um período de maior produção de energia. Pelo contrário, no sistema eólico, onde a produção de energia é determinada pela velocidade do vento, verificada uma intermitência intensa. Sendo extremamente difícil determinar com exatidão os períodos de maior produção.



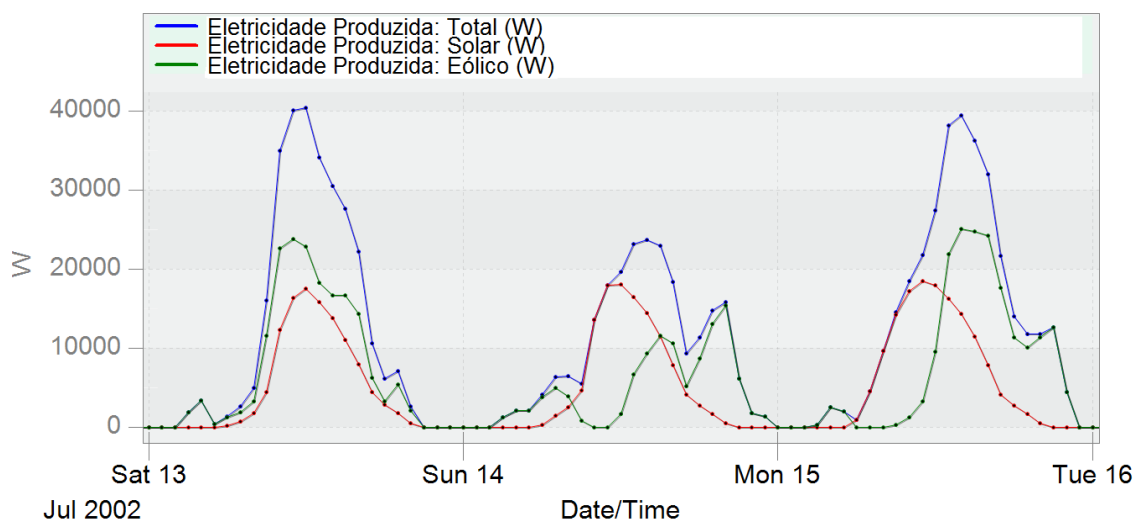


Figura 39 - Produção de eletricidade proveniente dos sistemas eólico e solar.

Pela Tabela 26 é possível verificar que durante o período do horário de verão (25 de Março a 25 de Outubro), os sistemas de energia renovável produzem 45688,17 kWh de eletricidade.

O sistema fotovoltaico apresenta uma produção de energia correspondente ao número de horas diárias de sol. Deste modo, é com naturalidade que se verifica a maior produção de energia no mês de Junho, mês com o maior número de horas de sol. A produção de energia nos meses de verão poderia ser maior caso os painéis tivessem inclinações pouco acentuadas. Porém neste estudo, os painéis são verticais na fachada e possuem uma inclinação de 35° no telhado do edifício.

Já a produção de energia eólica, apesar de se esperar uma maior energia durante os meses mais frios, a produção é bastante irregular. Por exemplo, no mês de Julho é produzido 3579,06 kWh de energia enquanto que no mês de Junho é somente produzido 313,92 kWh.

É importante salientar que no mês de março foram considerados apenas 7 dias (de 25 a 31). Enquanto no mês de outubro foram considerados os primeiros 25 dias do mês.

Tabela 26 - Produção de eletricidade para o horário de verão

	Fotovoltaico (kWh)	Eólico (kWh)
Março	787,93	1788,58
Abril	3420,35	4175,33
Maio	3538,14	5942,99
Junho	3665,40	313,92
Julho	3641,53	3579,06
Agosto	3627,08	1932,43
Setembro	3044,95	780,86
Outubro	2170,55	3279,07
<b>Total</b>	<b>23895,93</b>	<b>21792,24</b>

- **Caso 1 - Edifício sem banco de gelo**

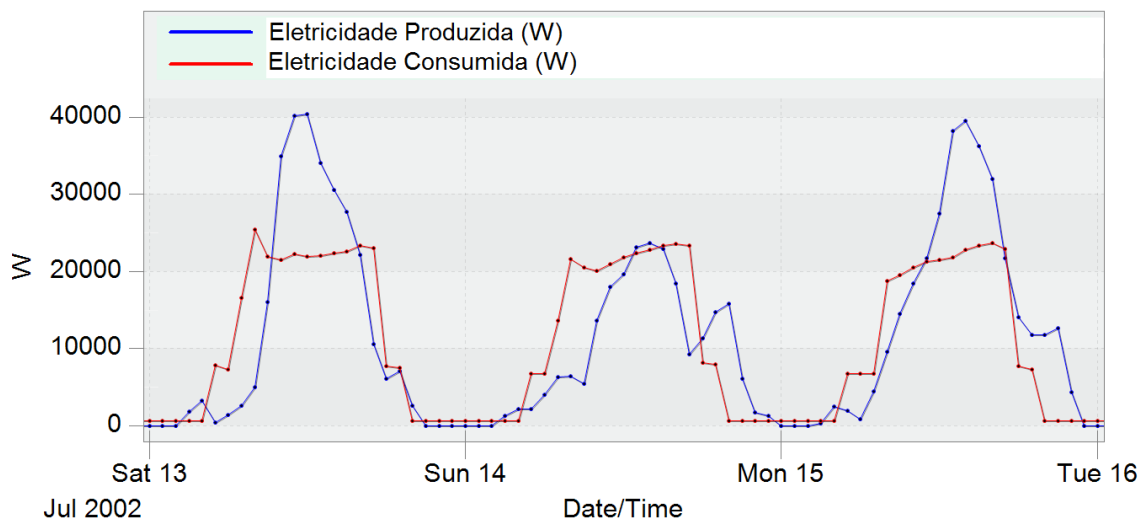


Figura 40 - Produção e consumo de eletricidade – Caso 1

Tabela 27 - Produção e consumo de eletricidade para o *design day* – Caso 1

Eletricidade					
Produzida	Consumida	Excesso		Comprada à rede	
Total (kWh)	Total (kWh)	Total (kWh)	Venda à rede (€)	Total (kWh)	Custo (€)
323,92	256,82	101,26	4,55	34,17	4,19

Na Figura 40 e Tabela 24 é possível verificar que a introdução dos sistemas de energia renovável detém um elevado impacto no balanço energético do edifício. O custo com a

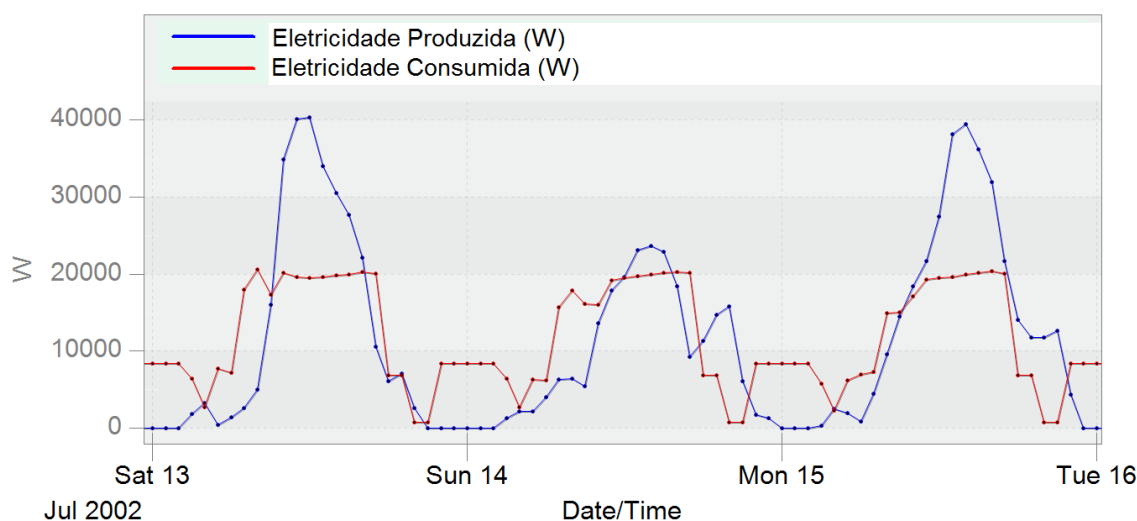
eletricidade baixou para os 4,19 € (no caso otimizado seriam 45,01 €). Apesar de o valor de venda de eletricidade ser extremamente baixo, se o utilizador optasse por essa via, ainda seria possível obter 4,55 € da venda de energia excedente. Deste modo, não só permite anular o custo associado ao consumo de energia, como também seria possível retirar proveito financeiro. No entanto também é possível observar que a produção de energia é reduzida no dia 14, sendo a energia excedente também ela muito reduzida. Efetuando uma análise idêntica ao que foi realizada para o dia 15, é possível observar que as conclusões retiradas para esse dia não são aplicáveis no dia 14 (Tabela 28).

Este é um bom exemplo para demonstrar a imprevisibilidade de um sistema eólico. Apesar de serem dois dias consecutivos, a produção de energia eólica mudou drasticamente.

**Tabela 28 - Produção e consumo de eletricidade para o dia 14 Julho – Caso 1**

Eletricidade					
Produzida	Consumida	Excesso		Comprada à rede	
Total (kWh)	Total (kWh)	Total (kWh)	Venda à rede (€)	Total (kWh)	Custo (€)
227,73	269,21	36,88	1,66	78,36	11,66

- **Caso 2 - Edifício com banco de gelo de apoio ao chiller principal**



**Figura 41 - Produção e consumo de eletricidade – Caso 2**

Na Figura 41, é possível verificar que a introdução do banco de gelo permite deslocar parte das necessidades energéticas de pico para o período noturno, levando a um aumento de energia excedente disponível no pico de produção. Como a energia é vendida a um

preço inferior ao que é comprada, esta solução não se representa como economicamente atrativa.

**Tabela 29 - Produção e consumo de eletricidade para o *design day* – Caso 2**

Eletricidade					
Produzida	Consumida	Excesso		Comprada à rede	
Total (kWh)	Total (kWh)	Total (kWh)	Venda à rede (€)	Total (kWh)	Custo (€)
323,92	271,81	115,77	5,20	63,67	5,75

Diferente do que acontece no caso 1, se o utilizador optar por vender toda a energia excedente, não seria possível anular os custos elétricos associados à utilização do edifício (Tabela 29). Assim sendo, torna-se pouco interessante estudar a utilização de um banco de gelo quando conjugado com os sistemas de energia renovável se os resultados apresentados forem piores que no caso inicial.

Para contornar esse facto, foi estudado uma nova abordagem. Esta abordagem consistiu em utilizar parte da energia excedente para carregar o banco de gelo ao longo do dia e deste modo anular a necessidade de compra de eletricidade para carregar o banco. Na Tabela 30 é possível verificar que no dia 15 de julho (*design day*), o chiller responsável pelo carregamento do banco de gelo possui um consumo total de 47,33 kWh. Considerando que a potência máxima do chiller é 6685,5 kWh, valor que é atingido quando inicia o carregamento noturno, foi possível verificar que seria possível canalizar 62,80 kWh da energia excedente e deste modo, satisfazer o objetivo desta abordagem.

Porém, este pressuposto só é válido caso no dia seguinte, a utilização dos sistemas de climatização e a produção de energia seja idêntica à gerada no dia anterior, pois os 62,80 kWh seriam usados para carregar o banco de gelo para o dia seguinte, e não para o próprio. Outro aspeto que não foi considerado é o facto do COP (*Coefficient of Performance*) do chiller ser menor durante a sua utilização em períodos diurnos, onde a temperatura exterior é superior à temperatura inicialmente simulada, tornando o sistema menos eficiente. Sendo assim, o consumo de energia do chiller de carregamento ainda poderia sofrer um ligeiro aumento em relação ao retratado nos resultados.

Apenas seria possível corrigir estes fatores se a simulação dinâmica fosse realizada com um controlo mais sofisticado. Na impossibilidade dessa condição, considerou-se que para calcular, de uma forma manual, valores credíveis seria necessário utilizar os seguintes pressupostos:

- O chiller do banco de gelo utiliza o maior valor possível de energia proveniente do excedente da produção do dia anterior, sendo o restante injetado na rede;
- A utilização do chiller do banco de gelo no período diurno apresenta o mesmo consumo e COP praticado no período noturno;
- O excedente máximo disponível, todas as horas, para uso no chiller está limitado à potência máxima registada no dia seguinte;

- Não é possível utilizar o excedente de energia no chiller do banco do gelo quando este já se encontra em funcionamento ou quando o banco de gelo está completamente carregado;
- Toda a energia gerada pelo chiller através do uso da energia excedente, só pode ser utilizada no dia seguinte.

**Tabela 30 - Consumo do chiller do banco de gelo e a eletricidade produzida em excesso disponível para carregar o banco de gelo – Caso 2**

Chiller do banco do gelo		Eletricidade produzida em excesso
Consumo (kWh)	Potência Máxima atingida pelo chiller (W)	Disponível para uso no chiller (kWh)
47,33	6685,5	62,80

Na Tabela 31, são apresentados os resultados para a situação em que o excedente de energia seria suficiente para carregar o banco de gelo, permitindo desse modo, anular consumo associado ao chiller de carregamento do banco do gelo. Como o consumo total diminui, o excedente de energia aumenta. Ao excedente foi retirado a energia necessária para carregar o banco de gelo do dia seguinte.

Nesta solução já é possível anular o custo total de funcionamento, tal como acontece no caso 1.

**Tabela 31 - Produção e consumo de eletricidade para o *design day*, caso seja anulado o consumo do chiller do banco de gelo – Caso 2**

Chiller do banco do gelo (no dia seguinte)		Eletricidade produzida em excesso (nova)			Comprada à rede	
Consumo (kWh)	Potência Máxima atingida pelo chiller (W)	Disponível para uso no chiller no dia seguinte (kWh)	Disponível após utilização no chiller (kWh)	Venda à rede (€)	Total (kWh)	Custo (€)
47,02	6685,5	62,80	72,41	3,25	20,00	2,10

- **Caso 3 - Edifício com banco de gelo de apoio ao chiller principal, evitando o uso do chiller em horas de ponta**

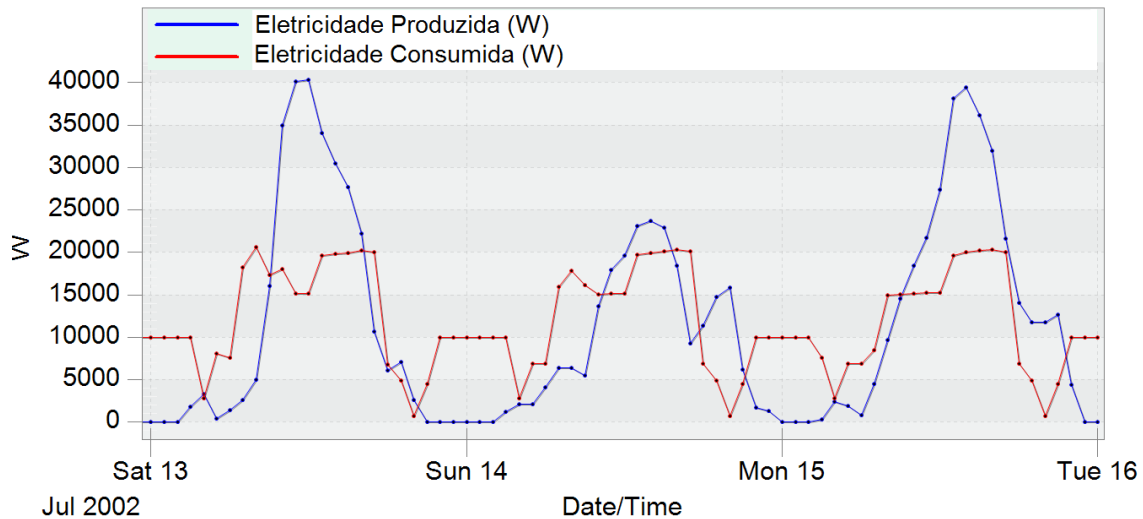


Figura 42 - Produção e consumo de eletricidade – Caso 3

Este caso vai de encontro com ao que foi referido no anterior. Porém neste é possível armazenar uma maior quantidade de energia no banco do gelo e assim deslocar uma maior quantidade de energia do período diurno. Na Figura 42 também é facilmente identificável a diminuição do consumo nas horas de ponta, que conseqüentemente leva a uma maior poupança económica.

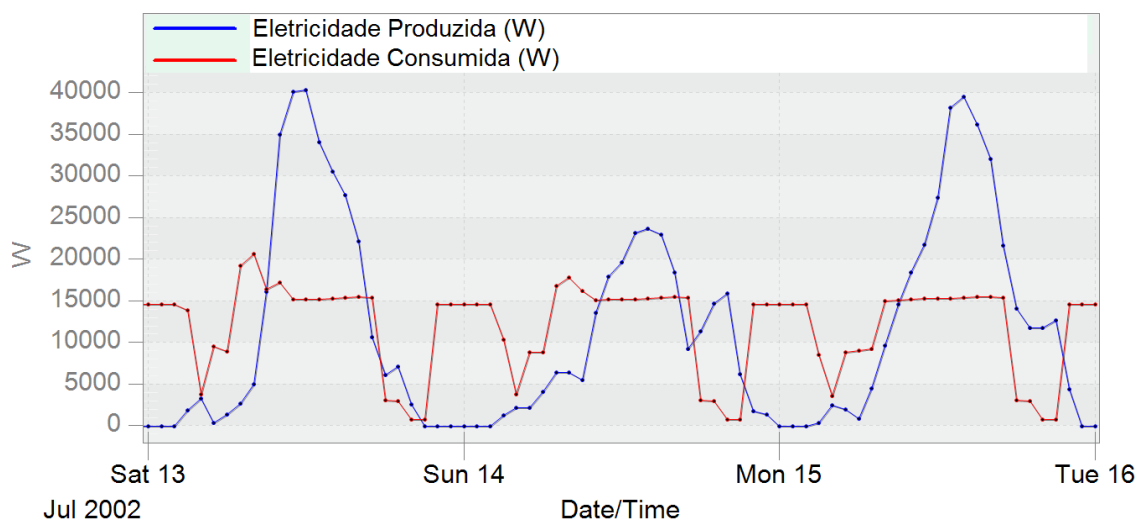
O aumento do número de horas onde existe excedente de energia é também benéfico para a solução que utiliza essa energia para voltar a carregar o banco de gelo.

Em suma, apesar do consumo do chiller aumentar, a energia excedente disponível de ser usado no chiller também aumenta. Esse facto também é visível na Tabela 32.

Tabela 32 - Produção e consumo de eletricidade para o *design day*, caso seja anulado o consumo do chiller do banco de gelo – Caso 3

Chiller do banco do gelo (no dia seguinte)		Eletricidade produzida em excesso (nova)			Comprada à rede	
Consumo (kWh)	Potência Máxima atingida pelo chiller (W)	Disponível para uso no chiller no dia seguinte (kWh)	Disponível após utilização no chiller (kWh)	Venda à rede (€)	Total (kWh)	Custo (€)
55,50	8022,6	78,70	75,68	3,40	21,44	2,22

- **Caso 4 - Edifício onde o banco de gelo tem prioridade sobre o chiller (*storage-priority*)**



**Figura 43 - Produção e consumo de eletricidade – Caso 4**

De todos os casos estudados, o quarto é o que apresenta os consumos de eletricidade mais constantes (Figura 43). Este facto é de extrema relevância para diminuir a energia comprada durante o período diurno, pois permite mesmo em dias de menor produção, diminuir significativamente a energia comprada. O problema deste modelo reside nos elevados consumos noturnos. Como a produção de energia neste período é mínima, será sempre necessário comprar grandes quantidades de eletricidade à rede. Os consumos constantes também conduzem a um aumento da energia excedente distribuído pelo período diurno. Este facto permite aumentar consideravelmente a energia excedente disponível para uso no chiller secundário e assim anular o problema identificado, tal como é demonstrado na Tabela 33.

**Tabela 33 - Produção e consumo de eletricidade para o *design day*, caso seja anulado o consumo do chiller do banco de gelo – Caso 4**

Chiller do banco do gelo (no dia seguinte)		Eletricidade produzida em excesso (nova)			Comprada à rede	
Consumo (kWh)	Potência Máxima atingida pelo chiller (W)	Disponível para uso no chiller no dia seguinte (kWh)	Disponível após utilização no chiller (kWh)	Venda à rede (€)	Total (kWh)	Custo (€)
81,07	12033,9	115,62	77,21	3,47	25,23	2,50

- **Caso 5 - Edifício onde o banco de gelo tem prioridade sobre o chiller (*storage-priority*), evitando o uso do chiller em horas de ponta**

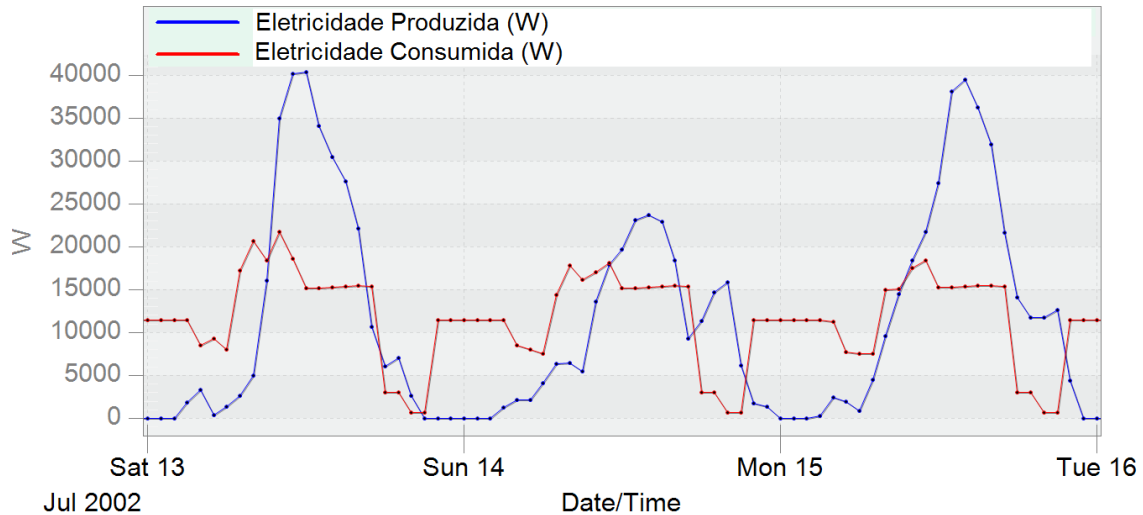


Figura 44 - Produção e consumo de eletricidade – Caso 5

Como é visível na Figura 44, os resultados são idênticos ao caso anteriormente. Porém, este caso apresenta um chiller do banco de gelo menor, permitindo diminuir o consumo elevado que o caso 4 apresentava e desse modo diminuir a eletricidade necessária à noite. Este facto é de elevada importância, pois a quantidade de energia excedente necessária para carregar o chiller torna-se menor, sendo mais fácil anular a necessidade de compra de eletricidade para a sua utilização, mesmo em dias de menor produção de energia. O chiller principal é utilizado durante o período diurno, contudo é evitado durante as horas de pico, permitindo que este tenha impacto menor no consumo energético e no aspeto económico.

Apesar deste caso ser semelhante ao anterior, a energia vendida à rede será maior neste caso, pois como já foi referido, o chiller apresenta consumos menores. A energia comprada também será ligeiramente maior devido ao consumo do chiller principal.

Pelos valores verificados na Tabela 34, o custo real (a diferença entre a energia comprada e vendida à rede) é maior quando comparado ao caso 4. Porém, nestas simulações foi considerado que o excedente do dia anterior seria suficiente para satisfazer todas as necessidades do chiller secundário. Para os dias em que a produção de energia não consiga cumprir esse requisito, os resultados apresentados poderão ser bastante distintos.

De salientar que em todos os casos estudados, o consumo do banco de gelo é completamente satisfeito pela energia excedente.



**Tabela 34 - Produção e consumo de eletricidade para o *design day*, caso seja anulado o consumo do chiller do banco de gelo – Caso 5**

Chiller do banco do gelo (no dia seguinte)		Eletricidade produzida em excesso (nova)			Comprada à rede	
Consumo (kWh)	Potência Máxima atingida pelo chiller (W)	Disponível para uso no chiller no dia seguinte (kWh)	Disponível após utilização no chiller (kWh)	Venda à rede (€)	Total (kWh)	Custo (€)
71,21	9359,7	93,61	82,64	3,71	27,27	2,84

Na Tabela 35, estão demonstrados todos os resultados possíveis para cada caso no *design day*. A produção de energia proveniente dos sistemas renováveis é de 323,92 kWh.

A expressão “s/ chiller” (sem chiller) representa o método em que o excedente de energia é utilizado no chiller do banco de gelo, permitindo retirar o seu consumo dos cálculos efetuados, apesar de não ser sempre possível anular completamente tais custos.

Para os dias onde o banco de gelo é carregado completamente pela energia excedente, é possível verificar que os casos onde se regista o maior consumo de energia (caso 2 e 3), também são os casos onde se pode retirar um maior aproveitamento económico da solução implementada. O perfil de consumo e produção são idênticos, o que permite diminuir a necessidade de compra de energia. São também os dois casos onde o chiller secundário possui uma capacidade de arrefecimento menor, e consequentemente consumos menores, sendo estes facilmente anulados pela energia excedente. Em suma, são os casos onde é registado a menor necessidade de compra de eletricidade à rede. Este dado é decisivo para o custo real, pois a diminuição da energia comprada é mais vantajoso que o aumento da energia excedente.

**Tabela 35 - Produção e consumo de eletricidade para o *design day* - todos os casos**

Caso	Eletricidade					
	Consumida	Excesso		Comprada à rede		Custo real
	Total (kWh)	Total (kWh)	Venda à rede (€)	Total (kWh)	Custo (€)	(€)
1	256,82	101,26	4,55	34,17	4,19	-0,39
2	279,42	115,77	5,20	63,67	5,75	0,55
2 (s/ chiller)		72,41	3,25	20,00	2,10	-1,15
3	271,39	128,27	5,76	75,75	6,74	0,98
3 (s/ chiller)		75,68	3,40	21,44	2,22	-1,18
4	272,08	156,28	7,02	104,44	9,11	2,09
4 (s/ chiller)		77,21	3,47	25,23	2,50	-0,97
5	268,61	150,99	6,78	95,62	8,54	1,76
5 (s/ chiller)		82,64	3,71	27,27	2,84	-0,87

**Tabela 36 - Produção e consumo de eletricidade para todos os meses do horário de verão – todos os casos**

	Produzido (kWh)	Consumido (kWh)				
		Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5
Março	2576,51	1409,02	1477,10	1505,54	1574,36	1525,7
Abril	7595,68	6603,25	7064,04	7220,52	7447,05	7176,07
Maió	9481,13	6932,73	7440,90	7505,91	7536,68	7278,19
Junho	3979,32	7757,13	8130,27	8083,26	8035,68	7837,67
Julho	7220,59	8737,49	9113,43	9068,12	9110,90	8916,67
Agosto	5559,51	8989,68	9221,63	9190,25	9196,99	9084,55
Setembro	3825,81	8452,95	8834,07	8825,59	8840,03	8614,3
Outubro	5449,62	6270,24	6602,22	6666,26	6690,79	6463,58
Total	45688,17	55152,49	57883,66	58065,45	58432,48	56896,73

A implementação de painéis fotovoltaicos pode provocar mudanças no consumo energético do edifício. Por exemplo, os painéis solares montados na cobertura do edifício criam sombra na superfície da envolvente, evitando assim a radiação direta, que por sua vez diminui a temperatura registada na superfície e consequentemente a carga térmica registada no edifício. A colocação de painéis na fachada também influenciam a carga térmica pois funcionam como camada isoladora da parede, permitindo assim diminuir a transferência de calor pelas paredes.

Nas simulações realizadas, é possível verificar que a introdução dos painéis fotovoltaicos permite diminuir entre 525 e 695 kWh do consumo total. Tendo em conta que a simulação realizada englobava somente 7 meses do ano, este valor poderá traduzir numa poupança anual considerável. Como só uma parcela reduzida da cobertura apresenta painéis, estas reduções de consumo são essencialmente provenientes da implementação dos painéis na fachada.

A legislação portuguesa define que a produção de energia não pode superar o consumo total anual. Pelos valores registados na Tabela 36, essa condição é facilmente cumprida. É no entanto interessante verificar que nos meses de abril e maio, a energia produzida excede a consumida.

Tabela 37 - Produção e consumo de eletricidade para o horário de verão - todos os casos

Caso	Excesso		Comprada à rede			Custo real	
	Total (kWh)	Venda à rede (€)	Total (kWh)	Custo (€)	Energia em relação ao caso 1 (%)	Total (€)	Em relação ao caso 1 (%)
1	11554,93	518,93	21019,25	3181,45	-	2662,52	.
2	12144,93	545,43	24340,42	3048,04	+ 15,80	2502,61	- 6,01
2 (s/ chiller)	9739,03	437,38	21932,92	2849,13	+ 4,35	2411,75	- 9,42
3	13027,30	585,06	25404,58	2945,60	+ 20,86	2360,54	- 11,34
3 (s/ chiller)	9678,64	434,67	22055,92	2696,94	+ 4,93	2262,27	- 15,03
4	14665,96	658,65	27410,27	2932,12	+ 30,41	2273,47	- 14,61
4 (s/ chiller)	9825,48	441,26	22569,79	2531,92	+ 7,38	2090,66	- 21,48
5	14485,08	650,52	25693,64	2860,21	+ 22,24	2209,69	- 17,01
5 (s/ chiller)	9983,14	448,34	21191,71	2494,54	+ 0,82	2046,19	- 23,15

As conclusões retiradas nas simulações do *design day*, não equivalem aos resultados obtidos nas simulações para o horário de verão (Tabela 37). Os casos 2 e 3 apresentavam o menor custo de funcionamento, contudo esse facto não é comprovado nesta simulação. Aliás, apresentam poupanças bastante tímidas. Isto deve-se ao facto de o dia 15 de Julho (*design day*) apresentar uma produção de energia elevada por um largo período de tempo, pois quando a produção de energia solar diminui, a energia eólica aumenta, sendo a combinação ideal para os casos 2 e 3. Quando essa combinação não é conseguida, ou quando a produção de energia é reduzida, não é possível obter resultados vantajosos. Deste modo, para uma utilização generalizada onde a produção de energia pode variar significativamente, os casos 4 e 5 (s/ chiller) são os mais adequados.

Na simulação otimizada, sem os sistemas de energia renovável, o menor custo de utilização foi verificado no caso 5, porém este apresentava um aumento de 2,8% no consumo total do edifício. Com a introdução dos sistemas de energia renovável, o consumo real do edifício, é representado pela quantidade de energia comprada à rede. Nesta simulação é possível verificar que para o mesmo caso, a energia comprada é sensivelmente a mesma que no caso 1 (+0,8%), contudo é possível obter uma poupança de 616,33 € (23,15%). Estes resultados são de extrema importância, pois permitem demonstrar que é possível obter uma poupança económica significativa sem que exista um aumento de energia exigida à rede.

No sentido oposto, os casos que não utilizam a energia excedente para carregar o banco de gelo, apesar de serem economicamente viáveis, registam aumentos expressivos na energia comprada à rede. É evidente que nestes casos a energia excedente vendida à rede também aumenta, mas os ganhos obtidos por essa venda são reduzidos.

Deste modo, caso o utilizador opte por instalar um sistema de energia renovável e um banco de gelo em simultâneo, é aconselhado a utilização da energia excedente, no chiller do banco de gelo.

### 3.2 Perfil Semanal

Até o momento foram apresentadas as análises de uma utilização diária para o edifício de estudo, porém na maioria dos casos reais, ao fim de semana, a utilização do edifício é mínima ou mesmo nula. Deste modo torna-se interessante estudar a utilização do edifício para um perfil semanal (segunda a sexta-feira), sendo que a ocupação ao fim de semana é inexistente e em termos elétricos, só a ventilação e 5% do equipamento interior continua em funcionamento.

Os resultados dessas simulações foram retratados nas tabelas seguintes.

**Tabela 38 - Consumos energéticos para o horário de verão, otimizado (perfil semanal) - todos os casos**

Caso	Arrefecimento		Total		Em relação ao primeiro caso 1			
	Consumo (kWh)	Custo (€)	Consumo (kWh)	Custo (€)	Consumo (%)		Custo (%)	
					Diário	Semanal	Diário	Semanal
1	12543,75	2153,97	44320,70	7569,76	-	-	-	-
2	14123,07	1788,31	46190,08	7246,02	+ 4,7	+ 4,2	- 4,3	- 4,3
3	14182,74	1480,45	46265,80	6942,41	+ 4,8	+ 4,4	- 8,6	- 8,3
4	14536,22	1310,02	46603,50	6768,14	+ 5,4	+ 5,2	- 11,0	- 10,6
5	13474,45	1306,52	45568,62	6769,09	+ 2,8	+ 2,8	- 11,2	- 10,6

Como seria de esperar, os resultados para os casos otimizados são idênticos tanto no perfil diário como num perfil semanal. Porém, como nestas simulações as necessidades de arrefecimento para o fim-de-semana foram eliminadas, a poupança máxima possível com a introdução do banco de gelo será menor. Por outro lado, quanto menor for a utilização do banco de gelo, menor será o aumento do consumo de energia. Tal como no perfil diário, o custo de eletricidade associado ao arrefecimento é menor no caso 5, contudo em termos totais, a maior poupança foi registada no caso 4, isto deve-se ao maior consumo da ventilação e das bombas de água do caso 5.

**Tabela 39 - Produção e consumo de eletricidade para o horário de verão (perfil semanal) - todos os casos**

Caso	Consumo	Excesso		Comprada à rede			Custo real	
	Total (kWh)	Total (kWh)	Venda à rede (€)	Total (kWh)	Custo (€)	Energia em relação ao caso 1 (%)	(€)	Em relação ao caso 1 (%)
1	43716,49	18851,04	846,60	16879,36	2555,41	-	1708,81	-
2	45655,08	19065,97	856,25	19266,52	2426,57	+ 14,1	1702,76	- 0,4
2 (s/chiller)		19299,61	866,75	16340,16	2184,26	- 3,2	1448,94	- 15,2
3	45832,40	19897,84	893,61	20042,07	2332,19	+ 18,7	1438,58	- 15,8
3 (s/chiller)		16178,16	726,56	16322,39	2047,16	- 3,3	1320,60	- 22,7
4	46174,79	21099,09	947,56	21585,70	2323,44	+ 27,9	1375,88	- 19,5
4 (s/chiller)		15680,45	704,21	16167,07	1873,94	- 4,2	1169,73	- 31,5
5	45024,77	20882,88	937,85	20219,48	2267,90	+ 19,8	1330,05	- 22,2
5 (s/chiller)		16155,98	725,57	15492,58	1877,05	-8,2	1151,48	- 32,6

O perfil semanal é particularmente benéfico na solução que apresenta um sistema de energia renovável, pois é possível utilizar energia excedente de sexta-feira (a partir das 8h da manhã), sábado e domingo de modo a carregar o banco de gelo. Deste modo, mesmo em situações onde a produção de energia é reduzida nesses dias (como nos dias de junho e setembro), será mais fácil carregá-lo completamente sem que este necessite de recorrer a energia comprada. Assim sendo, é possível afirmar que em pelo menos 1 em cada 5 dias o banco de gelo é completamente carregado com a energia excedente, anulando a necessidade de compra energia. As vantagens deste perfil são comprovadas na Tabela 39, onde é possível verificar que ao contrário da análise diária, todos os casos que apresentam bancos de gelo permitem reduzir a necessidade de compra de energia à rede. A maior descida percentual, quando comparada ao caso 1, foi registada no caso 4 onde a capacidade do banco de gelo é maior. Isto deve-se ao facto de ser este o caso onde é possível utilizar a maior quantidade de energia excedente de forma a carregar o banco de gelo. Os restantes casos comprovam esse dado, pois é possível verificar que a descida do consumo está diretamente conectada com a capacidade de armazenamento do banco de gelo, sendo registadas maiores descidas nos casos onde o banco de gelo é maior. Porém, o caso 4 continua a apresentar o maior consumo geral, sendo que um aumento do banco de gelo só faria com que o consumo aumentasse, podendo assim não diminuir o custo real.

É no caso 5 que se continua a verificar o melhor custo real, obtendo uma poupança de 678,36 € comparadamente ao caso 1. No entanto este caso (e o caso 1 também, mas este não possui interessante económico) ultrapassa um dos limites legais impostos na legislação sobre o autoconsumo. É verificado que o excesso de energia é maior que a energia comprada à rede. Isto indica que a produção é superior ao consumo do edifício, o que levaria a que 663,4 kW (equivalente a 29,79 €) da produção seja injetada a custo zero na

rede. Porém este balanço é anual, sendo ainda possível reverter a situação, caso a produção de energia seja menor no horário de inverno.

### 3.3 Retorno de investimento

Pelas simulações efetuadas foi comprovado que seria possível obter uma redução no custo associado às necessidades de arrefecimento. Porém é necessário verificar se é possível pagar o investimento realizado em período útil, para desse modo ter um retorno financeiro real.

Até o momento só foi realizada uma simulação para o horário de verão, porém para que seja possível verificar a poupança anual da introdução dos sistemas de energia renovável foi necessário proceder ao cálculo dos consumos para o horário de inverno. Foi definido que o banco de gelo não funcionava neste período, sendo apenas o chiller menor, responsável pelas poucas necessidades de arrefecimento que possam surgir neste período. Para esta simulação foi utilizado o chiller de 25 kWh, pois este é usado no caso 5 (e nos restantes, exceto o 3).

Para o perfil diário foi possível reduzir 3344,66 € ao custo total.

**Tabela 40 - Consumos energéticos para o horário de inverno, otimizado (perfil diário)**

	Comprada à rede (kWh)	Custo (€)	Excesso (kWh)	Venda à rede (€)	Custo real
Otimizado (sem renováveis)	36657,48	6158,81	-	-	6158,81
Otimizado (com renováveis)	19454,96	3253,72	9794,56	439,87	2813,85

Para o horário de verão foi verificado que o caso 5 apresenta um excesso de produção de 663,40 kW em relação ao consumo do edifício. De modo a que esta energia seja renumerada, é necessário verificar, no horário de inverno, se é possível anular esse valor. É verificado que a produção é 1058,37 kW inferior ao consumo, o que permite anular o excesso do horário de verão e garantir que toda a energia injetada na rede seja renumerada.

No perfil semanal ocorreu uma redução de 2921,22 € do custo total.

**Tabela 41 - Consumos energéticos para o horário de inverno, otimizado (perfil semanal)**

	Comprada à rede (kWh)	Custo (€)	Excesso (kWh)	Venda à rede (€)	Custo real
Otimizado (sem renováveis)	28581,49	4785,71	-	-	4785,71
Otimizado (com renováveis)	14830,60	2483,00	13772,23	618,51	1864,49

Para calcular os investimentos efetuados, em primeiro lugar, foi necessário considerar as condições iniciais. Foi considerado uma instalação com dois chillers, um de 30 kW e outro de 25 kW. Cada kW adicional terá um preço de 45 \$ (42,54 €) [82].

Em termos de sistemas de energia renovável, a instalação dos painéis solares possui um custo de 1650 \$/kW (preço para a Alemanha) [83], enquanto o gerador eólico tem um preço de 1891 \$/kW (preço para Portugal) [84]. Sabendo que o edifício possui 48,6 kW de painéis solares e um gerador eólico com potência do 35 kW, é obtido o preço final de 146375 \$ (138506,06 €) pela instalação.

Em relação ao banco de gelo, as capacidades e os preços apresentados na Tabela 42 foram disponibilizados pelo comercializador, Calmac, presentes nos anexos.

Todas as conversões monetárias foram realizadas à taxa de câmbio praticada em 30/11/2015, sendo a conversão de 1 \$=0,945609 €.

**Tabela 42 - Modelos, capacidades e preços da instalação dos bancos de gelo**

Modelo	Capacidade (kWh)	Preço (\$)
1105	369	15300
1098	345	14300
1082	288	13300
1045	144	9700

Com os dados fornecidos, é possível realizar a regressão linear de modo a obter a equação:

$$\text{Preço} = 24,118 * \text{capacidade} + 6240,1 \quad (\text{eq.18})$$

Neste trabalho foram utilizados três diferentes capacidades. Os preços estão dispostos na Tabela 43.

**Tabela 43 - Capacidade e preços dos bancos de gelo estudados**

Capacidade (GJ)	Capacidade (kWh)	Preço (\$)	Preço (€)*
0,6	166,67	10259,85	9705,03
0,9	250,00	12269,60	11605,27
1,2	333,33	14279,35	13506,65

\* Conversão a 30/11/2015

Com os dados fornecidos torna-se possível calcular em quantos anos é atingido o retorno financeiro do investimento realizado. É no entanto necessário referir que nos cálculos foram omitidos qualquer tipo de apoios financeiros que possam surgir com a implementação destes sistemas.

Em relação à manutenção dos sistemas, o gerador eólico tem um custo anual de 1,5% (937,17 €) [85] do custo inicial. Como no sistema fotovoltaico não existem baterias, o custo de manutenção é praticamente inexistente [86], sendo apenas necessário realizar uma limpeza exterior aos painéis, de modo a não perderem eficiência. Assim sendo, foi adicionado um custo de 100 € para a sua manutenção. É no entanto necessário referir que foram desprezados os custos associados às alterações dos inversores, pois estes apenas possuem um tempo de vida útil de sensivelmente 10 anos, sendo que o custo da instalação dos sistemas fotovoltaicos aumentaria.

A manutenção do banco de gelo resume-se a verificar se solução aquosa possui um nível adequado de glicol, verificar o nível da água e adicionar biocida [87]. Assim sendo, foi considerada um valor de 100 € anuais.

Numa primeira análise foram apenas considerados a colocação do banco de gelo e o aumento do chiller, em alguns dos casos. Desta forma é possível verificar a viabilidade da introdução do banco de gelo.

**Tabela 44 - Custos, poupança e *payback* da instalação somente com o banco de gelo (diário)**

Caso	Custo (€)			Poupança anual (€)	Payback (anos)
	Consumo anual	Instalação	Manutenção anual		
1	16 393	-	-	-	-
2	15 858	9 705	100	435	22,29
3	15 446	11 818	100	847	13,96
4	15 207	14 145	100	1 086	13,03
5	15 316	11 818	100	977	12,09

Tendo em conta que o fornecedor de banco de gelo indica que este possui uma vida útil de 30 anos [87], todos os casos são economicamente viáveis. O caso 5 apresenta o menor *payback*, sendo o recomendado para a implementação no sistema (Tabela 44). Todavia, o que apresenta maior poupança anual é o caso 4. Isto deve-se ao facto de o custo associado com a potência contratada ser menor do que no caso 1 e 5. O *payback* não é menor neste caso devido ao custo mais elevado da instalação, porém a longo prazo esta solução permite um maior redução de custos do que aquela apresentada no caso 5.

Com a introdução dos sistemas de energia renovável, os custos associados à instalação aumentam significativamente e existem maiores custos de instalação. Porém, também os consumos diminuem drasticamente. Na Tabela 45 são exibidos os resultados para essa implementação. Os resultados correspondem às versões onde é utilizado a energia



excedente para carregar o banco de gelo, pois são os que apresentam maiores reduções de custo.

É ainda necessário referir que nas simulações onde existem sistemas de energia renovável, não foram considerados os custos associados à potência contratada, o que poderia implicar um custo anual adicional entre 300 a 500€ e consequentemente levar a um aumento à volta do *payback* da instalação (no pior dos casos 1 ano).

**Tabela 45 - Custos, poupança e *payback* da instalação com banco de gelo e sistemas de energia renovável (diário)**

Caso	Custo (€)			Poupança anual (€)	Payback (anos)
	Consumo anual	Instalação	Manutenção anual		
1	15 754	-	-	-	-
2	5 226	148 211	1 137	9 391	15,78
3	5 076	150 324	1 137	9 540	15,76
4	4 905	152 651	1 137	9 712	15,72
5	4 860	150 324	1 137	9 757	15,41

Tendo em conta que tanto os módulos dos painéis solares [88], como o gerador eólico [89] podem possuir um tempo útil de vida de 25 anos, os ganhos possíveis com esta instalação são enormes.

Todos os casos apresentam poupanças monetárias semelhantes. Deste modo, o *payback* para todos os casos é bastante idêntico. A diferença de *payback* entre o melhor e o pior são uns meros 4,44 meses.

Para o perfil semanal os valores estão expostos na Tabela 46 e 47.

**Tabela 46 - Custos, poupança e *payback* da instalação somente com o banco de gelo (semanal)**

Caso	Custo (€)			Poupança anual (€)	Payback (anos)
	Consumo	Instalação	Manutenção		
1	12 995	-	-	-	-
2	12 545	9 705	100	350	27,72
3	12 241	11 818	100	654	18,08
4	12 067	14 145	100	828	17,08
5	12 194	11 818	100	701	16,87

**Tabela 47 - Custos, poupança e *payback* da instalação com banco de gelo e sistemas de energia renovável (semanal)**

Caso	Custo (€)			Poupança anual (€)	Payback (anos)
	Consumo	Instalação	Manutenção		
1	12 355	-	-	-	-
2	3 313	148 211	1 137	7 905	18,75
3	3 185	150 324	1 137	8 033	18,71
4	3 034	152 651	1 137	8 184	18,65
5	3 016	150 324	1 137	8 202	18,33

Como seria de esperar, devido à diminuição da poupança anual possível, o *payback* da instalação sobe, pois apesar de funcionar em apenas cinco dias semanais, a instalação e a manutenção terão sempre o mesmo custo.

Na simulação só com o banco de gelo, foi verificado um aumento significativo dos anos em que é possível obter o retorno financeiro. O caso 5 continua a apresentar o melhor registo, porém no caso 4 foi verificada a menor subida. No caso 4 ocorreu um aumento de 4,05 anos enquanto que o caso 5 sofreu um aumento de sensivelmente 4,78 anos. O caso 4 torna-se mais atraente conforme o aumento do tempo de *payback*, pois esta solução permite uma poupança anual maior.

Já na simulação com os sistemas de energia renovável, o aumento registado não foi na mesma proporção. Isto deve-se ao aumento de energia excedente que é vendida à rede durante o fim-de-semana. Os casos permitem obter retorno financeiro em 18,75-18,33 anos, o que torna todos eles viáveis economicamente.

É importante referir que apesar de não ser considerado algum tipo de incentivo fiscal, eles existem e são possíveis de obter [90]. Permitindo dessa forma diminuir o *payback* da instalação. Por outro lado, também não foram consideradas o pagamento de taxa de registo da instalação, bem como, a instalação do sistema de telecontagem da energia produzida e injetada, e também a celebração do contrato de seguro de responsabilidade civil [78].

Outro fator que ainda não foi considerado e que beneficia o nosso estudo é a inflação do custo de energia elétrica. Se consideramos que este sofre uma inflação de 1% ao ano e a manutenção da instalação outro 1%, a conjugação de ambos os valores representam uma poupança anual de 1%, permitindo desse modo diminuir o *payback* da instalação. Os novos retornos financeiros para o caso 5 são demonstrados na Tabela 48.

**Tabela 48 - *Payback* da instalação considerando a inflação anual de 1% e 3% – Caso 5**

Perfil	Caso 5	Payback (anos)		
		Sem inflação	Com inflação a 1%	Com inflação a 3%
Diário	Sem renováveis	12,09	11,47	10,47
	Com renováveis	15,41	14,40	12,85
Semanal	Sem renováveis	16,87	15,66	13,85
	Com renováveis	18,33	16,91	14,82

Quando considerado a inflação anual nos custos totais, é possível verificar uma maior diminuição do *payback* nas instalações com sistemas de energia renovável. A poupança anual nessas instalações é muito superior aos registados nos casos sem sistemas energia renovável, o que leva a que o aumento de 1% ou 3% na poupança anual represente um valor monetário maior.

Todos os cálculos efetuados para determinar o *payback* do investimento, foram realizadas com os valores obtidos nas simulações otimizados, pois estes permitiam obter valor credíveis para cada situação. No entanto, na primeira simulação realizada, verificou-se que o chiller (para o caso 1) estava sobredimensionado. Verificamos também que se tratava de uma situação comum em casos reais. Deste modo, torna-se interessante verificar qual seria o retorno financeiro caso o utilizador tivesse optado por uma instalação eficiente. Na primeira simulação, o *software* atribui ao chiller uma capacidade de arrefecimento de 76,2 kW, porém para este cálculo foi considerado um de 55 kW, de modo a que possua a mesma capacidade de arrefecimento que a combinação das capacidades do caso otimizado. Todos os *setpoints* de temperatura foram respeitados. Nesta simulação não foi considerado o custo associado à potência contratada. Todavia, os casos 1 e 5 iriam possuir o mesmo custo, pois ambos teriam uma potência contratada de 34,5 kVA, sendo a poupança anual a mesma. O caso com os sistemas de energia renovável iria possuir um custo maior, contudo teria uma redução significativa na poupança anual registada.

**Tabela 49 - Custos, poupança e *payback* da instalação com banco de gelo e sistemas de energia renovável (perfil diário) – Caso 1 não otimizado**

Caso	Custo (€)			Poupança anual (€)	Payback (anos)
	Consumo anual	Instalação	Manutenção anual		
1	17 266	-	-	-	-
5 (só banco de gelo)	14 676	11 830	100	2 489	4,75
5 (banco de gelo + energia renovável)	4 860	150 324	1 137	11 268	13,34

Pelos dados apresentados na Tabela 49, é visível a rapidez com que é possível obter o retorno de investimento, no caso do sistema de AVAC ser dimensionado corretamente. Nestes cálculos foi considerado que o preço de um chiller de 55 kW seria equivalente ao da compra de dois chillers menores (25 kW e 30 kW). Apesar deste pressuposto poder conter erros, o *payback* é de tal modo rápido, que qualquer diferença de custos é facilmente anulada em pouco tempo. Também não foi considerado a inflação dos preços, o que poderia levar a melhores resultados.

### 3.4 Síntese do capítulo

Neste capítulo foram apresentados os resultados das simulações dinâmicas para os diferentes casos estudados. Esta análise teve como intuito, estudar a viabilidade da introdução de um banco de gelo num sistema de AVAC, tanto em termos energéticos como também monetários. Numa primeira fase, foi introduzido um banco de gelo numa implementação onde o chiller era auto-dimensionado pelo *EnergyPlus*, de modo a satisfazer todas as necessidades térmicas. Foi no entanto verificado que os casos desenvolvidos eram pouco eficientes, pois possuíam chillers sobredimensionados e/ou não era retirado todo o potencial de cada implementação. Procedeu-se então à otimização dos casos de estudo, permitindo uma aumento significativo na eficiência dos sistemas.

De modo a diminuir as necessidades de compra de eletricidade à rede, foram introduzidos sistemas de energia renovável, nomeadamente o eólico e o fotovoltaico na implementação. Estes sistemas possuem um grande problema, a sua intermitência. Deste modo foram estudadas formas de anular esse efeito. A lei em vigor sobre o autoconsumo torna-se a solução ideal para essa situação. Permite utilizar toda a energia produzida nos sistemas, no edifício, sendo que quando esta ultrapassa as suas necessidades, é possível injetar o excedente na rede, e desse modo retirar um aproveitamento económico da situação. Porém a venda de energia é feita a preços bastantes reduzidos, assim sendo foi estudado a possibilidade de utilizar esse excedente, no chiller do banco de gelo e assim carregar o banco de gelo sem a necessidade da compra de energia.

Por último, foi verificado qual seria o retorno de investimento para a situação em que é apenas aplicado o banco de gelo e outra situação em que são instalados os dois sistemas.

Para todas estas situações foram realizadas dois tipos de análise. Uma análise diária, que permite obter resultados para um maior número de dias de estudo, e assim verificar o seu comportamento de uma forma generalizada. A segunda análise foi realizada para um perfil semanal, sendo que este é o mais utilizado na generalidade das empresas.

Os principais resultados de cada fase são verificados nos seguintes tópicos.

- **Implementação do banco de gelo - Não otimizado**

O caso 1 possui consumos relativamente constantes, apesar da variância da taxa de arrefecimento do chiller. Este fator é explicado pela variância de caudal e COP.

No caso 2, o apoio do banco de gelo ao chiller, permite que este inicie o seu funcionamento mais tarde do que o caso 1. O consumo do chiller mantém-se perfeitamente constante durante toda a sua utilização, sendo ideal para anular picos de consumo e diminuir a potência contratada.

No caso 3, o facto de o chiller não funcionar nas horas de pico permite uma melhor utilização da energia armazenada no banco de gelo e uma diminuição do custo energético.

O caso 4 utiliza toda energia armazenadas nas primeiras horas funcionamento, permitindo ao chiller iniciar o seu funcionamento apenas após o banco de gelo estar

completamente descarregado. Em dias de menor calor é possível anular completamente o consumo do chiller principal e deste modo diminuir o custo total gasto com a eletricidade.

Como não existe necessidade de utilização do chiller antes das 10:30, o consumo do caso 5 é igual ao caso 4.

Após a realização de uma simulação para o horário de verão foi verificado que a implementação do banco de gelo permite reduzir, em todos os casos, o consumo associado às necessidades de arrefecimento. Esse consumo diminui, conforme a diminuição de utilização do chiller principal, sendo a maior poupança verificada no caso 4. Em termos económicos, a introdução do banco de gelo permitiu diminuir o uso de energia nas horas cheias e de ponta, onde o preço é maior, e deste modo diminuir drasticamente o custo anual da eletricidade.

Verificou-se por último que o chiller principal estava sobredimensionado, o que explica a diminuição de consumo quando a sua utilização é reduzida.

- **Implementação do banco de gelo – otimizado**

Como foi verificado que o chiller principal estava sobredimensionado, procedeu-se à modificação do caso 1, sendo o chiller sobredimensionado alterado para dois chillers de menor capacidade. Um chiller principal com capacidade de 30 kW e um de 25 kW que só entrava em funcionamento quando o principal não conseguia satisfazer as necessidades de arrefecimento ao longo do dia. Quando comparado com o caso inicial, foi visualizado uma diminuição significativa do consumo do chiller principal.

No caso 2, a única alteração efetuada foi a mudança do chiller sobredimensionado para um de 30 kW, pois verificou-se que no caso inicial a utilização do banco de gelo não era retirado todo o seu potencial.

No caso 3, devido à proibição de utilização do chiller principal nas horas de ponta, o banco de gelo é descarregado rapidamente nesse período. Para que nos dias de maior calor, o banco de gelo não fique completamente descarregado ao meio do dia, foi adicionado mais 0,3 GJ de capacidade de armazenamento. De modo a suportar esse aumento, foi necessário aumentar o chiller do banco de gelo para 30 kW. O chiller principal também foi alterado para 30 kW, tal como os casos anteriores. Não foi possível verificar a vantagem deste sistema na simulação do *design day*, pois a solução inicial já era suficiente para satisfazer as necessidades de arrefecimento. Porém o seu potencial é registado nos dias de maior calor exterior.

Para que o chiller principal não fosse acionado durante o dia, no caso 4 foi necessário aumentado a capacidade do banco de gelo para 1,2 GJ. Para que fosse possível carregar totalmente o banco de gelo, foi necessário mudar a capacidade do chiller secundário para 45 kW. Como o chiller principal só entrava em funcionamento depois do banco de gelo estar descarregado, o seu uso seria bastante reduzido, permitindo desse modo diminuir a sua capacidade para 25 kW. Seno que na simulação realizada para o *design day*, foi

possível anulado a sua utilização. Logo, toda a energia utilizada para arrefecer o edifício foi utilizada durante o período noturno, nas horas de vazio.

No caso 5, a capacidade do banco de gelo foi somente aumentado para 0,9 GJ e o seu chiller para 35 kW. Nos dias de maior calor, o chiller principal entrava em funcionamento durante as primeiras horas do dia, o que permitia que os 0,9 GJ fossem suficientes para satisfazer as restantes necessidades de arrefecimento até ao final do dia. Como o seu uso era limitado, a capacidade do chiller principal também foi modificada para 25 kW.

Quando comparado todas as simulações para o horário de verão, foi verificado que os casos com bancos de gelo deixaram de ser os mais eficientes no consumo de energia. Todos eles verificaram consumos energéticos maiores, pois apesar de a temperatura exterior ser menor durante o período noturno, o setpoint do chiller de carregamento é muito inferior ao requerido no chiller principal. Este facto faz aumentar o consumo e diminui ligeiramente o COP. Apesar do aumento do consumo, o custo associado a este foi muito menor, sendo que o custo no caso 5 sofreu uma redução de 11,2% em relação ao caso 1.

Foi também estudado qual seria a potência contratada para cada caso. Verificou-se que os casos 2, 3 e 4 permitiam estar um escalão abaixo dos restantes. Quando este custo é adicionado às poupanças registadas, o caso 4 torna-se o mais vantajoso, tendo ultrapassado o caso 5.

Por último, foi verificado quais seriam os custos se fosse possível utilizar uma tarifa simples em vez da tri-horária. Determinou-se que o Caso 1 tinha custos ligeiramente superiores aos apresentados no caso 4 e 5 na tarifa tri-horária. Porém, estas poupanças poderiam ser insuficientes para justificar o investimento realizado nos bancos de gelo.

- **Implementação dos sistemas de energia renovável**

Com a introdução dos sistemas de energia renovável, os custos associados à compra de energia sofrem drásticas mudanças.

Para seguir as diretivas europeias sobre os nZEB, tornou-se praticamente uma obrigatoriedade o uso de sistemas de energia renováveis, sendo a energia elétrica produzida usada para o autoconsumo e o excedente injetado à rede.

Verificou-se logo à partida um problema relacionado com a legislação portuguesa em vigor. A potência dos sistemas não poderia ser superior à potência contratada. Deste modo, ignorou-se o custo associado a esta componente, pois este ultrapassava os limites de potência contratada para o tarifário selecionado, sendo necessário obter uma solução junto do comercializador de eletricidade.

Logo na primeira análise realizada é verificada a intermitência dos sistemas. O fotovoltaico detém uma produção padronizada, porém a eólica é bastante inconsistente, pois a diferença entre a energia produzida num dia e a energia produzida no dia seguinte pode ser significativa.

No caso 1 é verificado que a introdução dos sistemas energéticos permite diminuir drasticamente a energia comprada à rede e obter um benefício económico considerável da energia vendida à rede. O custo total da energia comprada é menor que o da venda, permitindo anular totalmente o custo associado à compra de energia e ainda obter um retorno monetário. Em seguida foi realizada a mesma análise para o dia anterior, que apresenta um produção de energia muito menor, sendo verificado que as conclusões retiradas não se aplicavam a este dia. Sendo o custo muito superior ao registado no dia 15.

No caso 2, tanto a eletricidade comprada como a vendida à rede aumenta ligeiramente, pois parte do consumo do período diário foi deslocado para o período noturno. Como a energia comprada é sempre mais cara do que a vendida, torna esta solução pouco atrativa, sendo possível obter melhores resultados com o caso 1. Deste modo procedeu-se ao estudo de uma alternativa que melhorasse a viabilidade do caso. Foi analisada a situação em que sempre que fosse possível, a energia excedente seria usada no chiller do banco de gelo, para que este carregasse o banco do gelo. Esta situação permitiu reduzir significativamente a energia comprada à rede, tornando-se economicamente mais interessante que o caso 1.

Das simulações realizadas para o *design day*, verificou-se que teoricamente, os casos 2 e 3 apresentavam a menor necessidade de compra de eletricidade, sendo os financeiramente mais atrativos de ser implementados. Porém, estes resultados só foram possíveis de obter devido a semelhança da curva de consumo com a de produção. Depois de efetuar a análise para o horário de verão, verificou-se que estes dois casos tornaram-se os piores entre os casos com banco de gelo. Indicando que os casos 2 e 3 não eram ótimos para o uso generalizado, pois para dias onde as condições não eram ótimas, os ganhos eram bastante tímidos. O caso 5 verificou-se como a melhor alternativa, pois apesar do consumo ser maior que no caso 1, a energia comprada à rede era sensivelmente a mesma, registando apenas um aumento de 0,82%, permitindo no entanto poupar 23,15% do custo total de energia. Em suma, os casos que permitiam diminuir a energia comprada à rede eram os melhores financeiramente, pois o preço de venda de eletricidade à rede era extremamente baixo.

Visualizou-se também que a colocação dos painéis fotovoltaicos permitia diminuir o consumo total de energia elétrica do edifício. Isto deveu-se ao facto de os painéis na fachada possuírem um efeito de camada isoladora, diminuindo a transferência de calor para o interior.

- **Perfil semanal**

A maioria dos edifícios de serviços funcionam unicamente durante os dias de semana (segunda a sexta), sendo a utilização mínima ou nula ao fim de semana. Deste modo torna-se interessante realizar uma análise semanal. Deste modo considerou-se que durante o fim-de-semana, a ocupação era nula, estando unicamente ligados 5% dos equipamentos e a ventilação.

Para os edifícios que apenas possuem banco de gelo (sem sistemas de energia renovável), a percentagem de consumos e custos verificou-se idêntica ao perfil diário, porém como o consumo diminui drasticamente durante dois dias semanais, as poupanças monetárias obtidas são menores.

A implementação de sistemas de energia renovável no edifício para um perfil semanal é particularmente benéfico, pois é possível utilizar a energia excedente, produzida no fim-de-semana, para carregar o banco de gelo para segunda-feira. Deste modo é praticamente garantido que o banco de gelo é carregado completamente com a energia excedente. Este facto permite que os casos com banco de gelo, necessitam de comprar menor quantidade de energia à rede apesar do consumo total ser maior que o registado no caso 1. A maior redução de custos foi novamente visível no caso 5.

Foi verificado que no caso 5, no horário de verão, é produzido mais energia do que a aquela que é consumida. Devido às restrições impostas pela legislação, toda a energia que exceda esse limite, não será renumerada. É no entanto verificado que a produção de energia durante o horário de inverno é inferior ao consumo, o que permite anular esse aspeto.

- **Cálculo do retorno de investimento**

O último tópico estudado na dissertação focou-se na verificação do tempo necessário para obter retorno financeiro das implementações efetuadas.

Foi considerado como condição inicial que todos os sistemas possuíam um chiller de 30 kW e outro de 25 kW. Cada kW adicional tem o preço de 45 \$. Os painéis fotovoltaicos possuem um custo de 1650 \$/kW e os geradores eólicos um custo de 1891 \$/kW. Os preços dos bancos de gelo foram registados com o apoio de uma lista disponível pelo comercializador Calmac.

Foi considerado que a manutenção do gerador eólico possuía um preço igual a 1,5% do seu custo inicial. Como os painéis fotovoltaicos só necessitavam de uma limpeza exterior, foi considerado um custo anual de 100 €. O banco de gelo também possui um custo reduzido, sendo considerado um custo anual de 100 €.

Para a instalação só com o banco de gelo, foi verificado que o melhor payback seria possível obter com o caso 5. Porém o caso 4 apresenta maiores ganhos. Este só não apresenta um payback menor, devido ao investimento inicial superior ao ca caso 5. Verificou-se que essa diferença diminuía conforme o aumento do payback. Se consideramos que o banco de gelo possui um tempo útil de vida de 30 anos, todos os casos são economicamente viáveis.

Na instalação com o sistema de energia renovável, para o perfil diário o payback rondava os 15-16 anos e o no semanal rondava os 18-19, sendo que o payback era idêntico para todos os casos com banco de gelo. O melhor registo voltou-se a verificar no caso 5.



Como o caso apresentava o menor tempo de retorno de investimento, foi estudado qual seria o efeito de uma inflação anual de 1%. Verificou-se que seria possível diminuir o payback em 1 ano.

Por último, foi realizado uma comparação entre o caso 5, que apresenta os melhores resultados, e o caso 1 - não otimizado, que representa o caso inicial de referência, tendo este um chiller sobredimensionado, algo que ocorre frequentemente em casos reais. Verificou-se um rápido retorno financeiro das implementações realizadas, pois as poupanças anuais registadas eram significativas.

## Capítulo 4

### 4 Conclusões e trabalho futuro

Após a realização do estudo e analisados os seus resultados, passa-se à apresentação das principais conclusões, terminando com algumas sugestões de trabalho futuro.

#### 4.1 Conclusões gerais

No presente trabalho estudou-se o papel do armazenamento de energia térmica num sistema de AVAC, tendo como objetivos verificar a viabilidade energética e económica da sua instalação. Sendo que foram estudados cinco Casos distintos de modo a identificar qual seria solução que permitiria retirar um melhor aproveitamento do sistema existente.

A metodologia proposta neste trabalho foi baseada, numa fase inicial, na implementação do edifício utilizando o *software* DesignBuilder. Nele foram inseridos todos os aspetos possíveis e necessário para realização da simulação dinâmica do edifício. Todavia, foi necessário importar o ficheiro para o EnergyPlus de modo a ser possível a implementação do banco de gelo no sistema.

Numa primeira instância foi verificado que o consumo associado ao arrefecimento poderia deter uma parcela de 42,1% do consumo total do edifício, caso o chiller principal estivesse sobredimensionado, tal como ocorre num grande número de edifícios. Sendo neste caso possível diminuir até 33,4% do consumo relacionado com o arrefecimento caso se opte pela implementação de um banco de gelo. O custo seria diminuído em 2855,69 €. Esta implementação poderia ser interessante em situações onde o investimento no chiller já tenha sido realizado e que com um investimento num banco de gelo conseguiria diminuir significativamente o custo total anual, permitindo uma rápida recuperação do investimento realizado.

Num caso otimizado, o consumo elétrico associado ao arrefecimento corresponde a 29,3% do consumo total. A introdução do banco de gelo aumenta o consumo total da instalação. O chiller do banco de gelo possui um *setpoint* de temperatura de saída muito inferior ao chiller principal, levando a que este consuma uma maior quantidade de energia para satisfazer essa condição. Deste modo, o caso 4, que apresenta um banco de gelo com capacidade maior, necessita de uma maior utilização do chiller durante o período noturno, sendo o caso onde é verificado o maior consumo anual. O caso 5 registou o menor aumento de consumo (2,8%) e a maior redução de custo total (11,2%). Isto demonstra que

utilização do chiller principal em casos pontuais é mais benéfico do que a tentativa de anulação do seu consumo tal como é realizado no caso 4.

No entanto, o facto de no caso 4 se anular o consumo do chiller, leva a que o pico de consumo seja menor que nos restantes casos (exceto o caso 3). O que pode levar a que a potência contratada seja menor, tornando-se economicamente mais atrativo, apesar de ser o caso onde se regista o maior consumo de energia.

Caso a instalação possuir um consumo menor que 20,7 kVA, verificou-se que as poupanças obtidas com o tarifário tri-horário seriam marginais quando compradas ao tarifário simples, podendo não ser possível retirar retorno do investimento realizado.

No que diz respeito à implementação dos sistemas de energia renovável, os painéis fotovoltaicos permitem obter uma produção de energia diária relativamente constante, porém está limitada ao número de horas de luz durante o dia. Uma vantagem deste sistema é que a sua produção máxima corresponde ao pico de consumo do edifício, o que permite consumir uma maior quantidade de energia proveniente do sistema. Porém a introdução de uma maior quantidade de painéis solares não traz proveito à instalação pois só iria permitir uma maior quantidade de energia excedente, sobrecarregando a rede. O sistema eólico permite contornar esse problema pois permite a produção de energia em qualquer altura do dia. Contudo a inconsistência de produção é um enorme problema deste sistema.

Como a energia vendida à rede possui um preço inferior à energia de compra, o melhor resultado seria possível obter nos casos em que a eletricidade comprada seria menor. Esse facto torna a aplicabilidade do banco de gelo conjugado com os sistemas de energia renovável bastante reduzida, pois o banco de gelo tem como objetivo deslocar parte da energia consumida durante o período diurno para o período noturno. Como a energia produzida durante esse período é bastante reduzida, esta implementação só iria aumentar a eletricidade comprada à rede. Para contornar essa limitação, foi utilizado o banco de gelo como uma bateria, sendo que o excedente de energia iria diretamente para o chiller de carregamento para desse modo carregar o banco de gelo. Este método verificou-se bastante eficiente.

Verificou-se que os melhores resultados seriam obtidos nos casos onde o consumo tinha um perfil idêntico à energia produzida, pois diminuía a energia comprada. Porém para os dias onde a produção era reduzida ou possuíam um perfil diferenciado do consumo, os casos com consumos constantes permitem obter melhores resultados. Devido à imprevisibilidade dos sistemas eólicos, que criam uma amplitude diversificada de perfis de produção, os casos que possuem consumos constantes são a melhor solução para uma utilização anual.

Apesar dos consumos totais serem superiores nos casos com banco de gelo, o caso 5 apresenta uma necessidade de compra à rede bastante semelhante ao caso sem banco de gelo (aumento de 0,82%), mas permite uma poupança de 23,15% do custo total.

A mudança para um perfil semanal permite obter resultados interessantes. Nesta situação, todos os casos que utilizam bancos de gelo conseguem diminuir a necessidade de compra de eletricidade à rede, apesar de continuarem a apresentar consumos maiores

comparadamente ao caso sem banco de gelo. Como toda a energia excedente gerada a partir das 8:00h de sexta-feira pode ser utilizada para carregar o banco de gelo, é praticamente garantido que esta energia seja suficiente para carregar completamente o banco de gelo para a utilização de segunda-feira e deste modo diminuir tanto a compra como a venda de eletricidade. O caso 5 apresenta o melhor resultado, sendo possível diminuir em 8,2% a eletricidade comprada à rede, e diminuir o custo de funcionamento em 32,6% comparadamente ao caso sem banco de gelo. Dos mais de 45 MWh de consumo total, é apenas necessário comprar 15,5 MWh de eletricidade, o que representado uma diminuição de 65,6%.

No perfil diário o edifício produz 77% do total de energia consumida e no perfil semanal 98%. O edifício no perfil semanal seria com certeza classificado como “nZEB”, não sendo ainda possível verificar se o do perfil diário também o seria, pois a percentagem ainda não foi definida, cabendo a cada país esclarecer esse valor.

O caso 5 com perfil semanal é especialmente interessante de ser usado em grande escala, pois a colocação do banco de gelo permite diminuir a energia comprada à rede e assim diminuir a quantidade de eletricidade a circular na rede. Quando existe um pico de procura de energia elétrica na rede, o edifício estudado não necessita de a comprar, pois o maior pico de produção é registado nesse período, sendo também produzida a maior quantidade de energia excedente nessa altura. Ou seja, o excesso de energia é injetado na rede, quando a procura é maior (este fator também acontece no perfil diário). A combinação destes dois fatores permite diminuir a energia gerada nas centrais elétricas evitando também a sobrecarga destas centrais durante o pico de procura, levando a que estas funcionem de uma forma mais eficaz e homogénea. Como estas centrais funcionam a energia fóssil, seria ainda possível diminuir a sua dependência da geração de energia. Por último, esta implementação possibilitava a anulação da maior fraqueza dos sistemas de energia renovável, a sua intermitência. Era possível armazenar energia para os períodos de menor produção e em simultâneo injetar eletricidade na rede quando a procura é maior.

Para o caso onde existe somente um banco de gelo, será possível recuperar o investimento realizado em 12,09 anos para o perfil diário e 16,87 anos para o perfil semanal. Porém a como já referido, a maior poupança anual foi possível no caso 4. Este apresenta um *payback* maior devido ao seu investimento inicial, porém a longo prazo o seu ganho será maior que no caso 5. Para as implementações com sistemas de energia renovável seria possível recuperar o investimento em sensivelmente 16 anos para o perfil diário e 19 anos no perfil semanal.

Tendo em conta que os sistemas possuem um período útil de 25 anos, e o banco de gelo 30 anos, todos os casos estudados são economicamente viáveis.

De uma forma geral, é possível verificar que a implementação dos bancos de gelo, caso sejam corretamente implementados, podem ser extremamente vantajosos em termos económicos, diminuindo no entanto a sua eficiência energética. Isto torna-o interessante para o utilizador, mas afasta-se do objetivo geral imposto pela comunidade internacional

de diminuir o consumo global dos edifícios. Com a introdução dos sistemas de energia renovável, torna-se possível a utilização da energia produzida para uso próprio (autoconsumo), injetando o excedente na rede. No entanto se esta implementação for realizada à escala global, poderá trazer problemas à rede elétrica, pois pode levar à ocorrência de períodos onde seja produzida uma elevada quantidade de energia excedente e registada uma baixa procura de eletricidade, levando à sobrecarga da rede. O armazenamento de energia torna-se essencial, tanto para o consumidor, pois os preços de venda são muito inferiores aos de compra, como para a rede, pois permite reduzir a carga nela presente. Deste modo, a integração dos sistemas de energia renovável em conjunto com os bancos de gelo, torna-se numa solução económica interessante, que permite ao utilizador diminuir o custo relacionado com o consumo, e numa solução energeticamente eficiente pois permite diminuir tanto a compra de energia como a sua venda, tornando o sistema elétrico mais equilibrado, isto é, com um diagrama de cargas mais homogéneo e eficiente.

## 4.2 Sugestões de trabalho futuro

Durante a realização do presente trabalho identificaram-se algumas áreas que podem e devem ser exploradas no futuro, em relação à utilização do armazenamento de energia térmica em sistemas de AVAC.

No que diz respeito ao edifício estudado, seria interessante estudar a utilização de um controlo que permitisse carregar no banco de gelo, somente a energia necessária para satisfazer as necessidades de arrefecimento do dia seguinte. Este controlo seria principalmente benéfico na simulação com sistemas de energia renovável, pois permitia uma melhor utilização da energia excedente e limitava a necessidade de compra à rede.

Durante a elaboração do trabalho verificou-se a limitação do *EnergyPlus* em utilizar a energia excedente para carregar o banco de gelo. Para trabalho futuro é sugerido a procura de um *software* auxiliar que permita resolver esse problema, anulando a necessidade de efetuar cálculos manuais.

Um problema verificado com a introdução do banco de gelo no sistema de AVAC está relacionado com a temperatura de mudança de fase da água. O facto de esta ocorrer aos 0°C, faz com que o *setpoint* de temperatura do chiller desça consideravelmente, quando comparado com o seu funcionamento normal, aumentando dessa forma o seu consumo. Para trabalhos futuros seria interessante verificar a potencialidade do uso de um PCM com temperatura de fusão maior.

Seria também interessante verificar a aplicabilidade desta implementação na estação de inverno, utilizado uma bomba de calor e um PCM com temperatura de fusão elevada.

A análise económica efetuada nesta dissertação foi bastante superficial, sendo ignorado algumas componentes que poderiam alterar a recuperação de investimento efetuado. Deste

modo, como trabalho futuro é sugerido a realização de uma análise económica mais aprofundada que permita obter valores mais conclusivos sobre o custo da instalação.

No futuro, com a obrigatoriedade da introdução dos sistemas de energia renovável nos edifícios, a procura de pico registada na rede será deslocada para outros pontos do dia. Deste modo, será interessante estudar quais seriam as alterações ocorridas na rede e como estes iriam influenciar o preço da eletricidade.

## Referências bibliográficas

- [1] International Energy Agency, “Key World Energy Statistics,” 2013.
- [2] European Commission, “Energy efficiency: delivering the 20% target,” 2008.
- [3] European Commission, “Package of Implementation measures for the EU’s objectives on climate change and renewable energy for 2020,” 2008.
- [4] Conselho Parlamento Europeu, “Directiva 2010/31/UE do Parlamento Europeu e do Conselho de 19 de Maio de 2010 relativa ao desempenho energético dos edifícios,” *J. Of. da União Eur.*, no. 153, pp. 13–35, 2010.
- [5] J. Laustsen, “Energy Efficiency Requirements in Building Codes , Energy Efficiency Policies for New Buildings,” *Buildings*, no. March, pp. 1–85, 2008.
- [6] J. J. Siirola and T. F. Edgar, “Process energy systems: Control, economic, and sustainability objectives,” *Comput. Chem. Eng.*, vol. 47, pp. 134–144, Dec. 2012.
- [7] F. Sakellariou, “Model Predictive Control for Thermally Activated Building Systems,” Eindhoven: TU Eindhoven, 2011.
- [8] B. Lehmann, V. Dorer, M. Gwerder, F. Renggli, and J. Tödtli, “Thermally activated building systems (TABS): Energy efficiency as a function of control strategy, hydronic circuit topology and (cold) generation system,” *Appl. Energy*, vol. 88, no. 1, pp. 180–191, Jan. 2011.
- [9] M. Gwerder and D. Gyalistras, “Final Report : Use of Weather And Occupancy Forecasts For Optimal Building Climate Control – Part II : Demonstration ( OptiControl-II ),” no. September, 2013.
- [10] J. Ko, “Understanding a Potential for Application of Phase-Change Materials ( PCMs ) in Building Envelopes,” pp. 3–13, 2013.
- [11] M. Pomianowski, P. Heiselberg, and Y. Zhang, “Review of thermal energy storage technologies based on PCM application in buildings,” *Energy Build.*, vol. 67, pp. 56–69, Dec. 2013.
- [12] B. M. Diaconu, “Thermal energy savings in buildings with PCM-enhanced envelope: Influence of occupancy pattern and ventilation,” *Energy Build.*, vol. 43, no. 1, pp. 101–107, Jan. 2011.
- [13] K. Lin, Y. Zhang, X. Xu, H. Di, R. Yang, and P. Qin, “Modeling and simulation of under-floor electric heating system with shape-stabilized PCM plates,” *Build. Environ.*, vol. 39, no. 12, pp. 1427–1434, Dec. 2004.
- [14] K. A. R. Ismail, C. T. Salinas, and J. R. Henriquez, “Comparison between PCM filled glass windows and absorbing gas filled windows,” *Energy Build.*, vol. 40, no. 5, pp. 710–719, Jan. 2008.
- [15] E. M. Alawadhi, “Using phase change materials in window shutter to reduce the solar heat gain,” *Energy Build.*, vol. 47, pp. 421–429, Apr. 2012.
- [16] P. Tatsidjodoung, N. Le Pierrès, and L. Luo, “A review of potential materials for thermal energy storage in building applications,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 18, pp. 327–349, Feb. 2013.

- [17] A. Sharma, V. V. Tyagi, C. R. Chen, and D. Buddhi, "Review on thermal energy storage with phase change materials and applications," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 13, no. 2, pp. 318–345, Feb. 2009.
- [18] Y. Ma, F. Borrelli, B. Hancey, A. Packard, and S. Bortoff, "Model Predictive Control of thermal energy storage in building cooling systems," in *Proceedings of the 48th IEEE Conference on Decision and Control (CDC) held jointly with 2009 28th Chinese Control Conference*, 2009, pp. 392–397.
- [19] H. O. Paksoy, Z. Gürbüz, B. Turgut, D. Dikici, and H. Evliya, "Aquifer thermal storage (ATES) for air-conditioning of a supermarket in Turkey," *Renew. Energy*, vol. 29, no. 12, pp. 1991–1996, Oct. 2004.
- [20] R. Ansuini, R. Larghetti, A. Giretti, and M. Lemma, "Radiant floors integrated with PCM for indoor temperature control," *Energy Build.*, vol. 43, no. 11, pp. 3019–3026, Nov. 2011.
- [21] K. Yanbing, J. Yi, and Z. Yinping, "Modeling and experimental study on an innovative passive cooling system—NVP system," *Energy Build.*, vol. 35, no. 4, pp. 417–425, May 2003.
- [22] H. Lahmidi, S. Mauran, and V. Goetz, "Definition, test and simulation of a thermochemical storage process adapted to solar thermal systems," *Sol. Energy*, vol. 80, no. 7, pp. 883–893, Jul. 2006.
- [23] M. A. R. Ali H. Abedin, "A Critical Review of Thermochemical Energy Storage Systems," *Open Renew. Energy J.*, vol. 4, pp. 42–46, 2011.
- [24] R. Weber and V. Dorer, "Long-term heat storage with NaOH," *Vacuum*, vol. 82, no. 7, pp. 708–716, 2008.
- [25] S.-Y. Liu, Y.-H. Perng, and Y.-F. Ho, "The effect of renewable energy application on Taiwan buildings: What are the challenges and strategies for solar energy exploitation?," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 28, pp. 92–106, Dec. 2013.
- [26] J. F. Mendes, A. Salgueiro, J. P. Cardoso, and R. E. Coelho, *Portugal 2020 e a Integração de Energias Renováveis nos Edifícios*. 2012.
- [27] M. J. Huang, P. C. Eames, and B. Norton, "Phase change materials for limiting temperature rise in building integrated photovoltaics," *Sol. Energy*, vol. 80, no. 9, pp. 1121–1130, Sep. 2006.
- [28] L. Aelenei, R. Pereira, and H. Gonçalves, "BIPV/T versus BIPV/T-PCM: A numerical investigation of advanced system integrated into Solar XXI building façade." 2013.
- [29] D. Ayhan and Ş. Sağlam, "A technical review of building-mounted wind power systems and a sample simulation model," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 16, no. 1, pp. 1040–1049, Jan. 2012.
- [30] M. M. Aman, G. B. Jasmon, A. Ghufuran, A. H. A. Bakar, and H. Mokhlis, "Investigating possible wind energy potential to meet the power shortage in Karachi," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 18, pp. 528–542, Feb. 2013.



- [31] X. Q. Zhai, M. Qu, X. Yu, Y. Yang, and R. Z. Wang, "A review for the applications and integrated approaches of ground-coupled heat pump systems," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 15, no. 6, pp. 3133–3140, Aug. 2011.
- [32] H. Afazeli, A. Jafari, S. Rafiee, and M. Nosrati, "An investigation of biogas production potential from livestock and slaughterhouse wastes," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 34, pp. 380–386, Jun. 2014.
- [33] A. Afram and F. Janabi-Sharifi, "Theory and applications of HVAC control systems – A review of model predictive control (MPC)," *Build. Environ.*, vol. 72, pp. 343–355, Feb. 2014.
- [34] G.-Y. Jin, P.-Y. Tan, X.-D. Ding, and T.-M. Koh, "Cooling Coil Unit dynamic control of in HVAC system," in *2011 6th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications*, 2011, pp. 942–947.
- [35] Z. Jun and Z. Kanyu, "A Particle Swarm Optimization Approach for Optimal Design of PID Controller for Temperature Control in HVAC," in *2011 Third International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation*, 2011, vol. 1, pp. 230–233.
- [36] S. Soyguder and H. Alli, "An expert system for the humidity and temperature control in HVAC systems using ANFIS and optimization with Fuzzy Modeling Approach," *Energy Build.*, vol. 41, no. 8, pp. 814–822, Aug. 2009.
- [37] I. Jetté, M. Zaheer-uddin, and P. Fazio, "PI-control of dual duct systems: manual tuning and control loop interaction," *Energy Convers. Manag.*, vol. 39, no. 14, pp. 1471–1482, Sep. 1998.
- [38] Y.-G. Wang, Z.-G. Shi, and W.-J. Cai, "PID autotuner and its application in HVAC systems," in *Proceedings of the 2001 American Control Conference. (Cat. No.01CH37148)*, 2001, vol. 3, pp. 2192–2196.
- [39] T. I. Salsbury, "A survey of control technologies in the building automation industry," *World Congr.*, vol. 16, no. 1, pp. 1396–1396, Jul. 2005.
- [40] F. Tahersima, J. Stoustrup, H. Rasmussen, and P. Gammeljord Nielsen, "Thermal analysis of an HVAC system with TRV controlled hydronic radiator," in *2010 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering*, 2010, pp. 756–761.
- [41] H. Moradi, M. Saffar-Avval, and F. Bakhtiari-Nejad, "Nonlinear multivariable control and performance analysis of an air-handling unit," *Energy Build.*, vol. 43, no. 4, pp. 805–813, Apr. 2011.
- [42] D. A. Hodgson, "Investigation of a nonlinear controller that combines steady state predictions with integral action," Colorado State University, 2010.
- [43] G. D. Pasgianos, K. G. Arvanitis, P. Polycarpou, and N. Sigrimis, "A nonlinear feedback technique for greenhouse environmental control," *Comput. Electron. Agric.*, vol. 40, no. 1–3, pp. 153–177, Oct. 2003.
- [44] M. Anderson, M. Buehner, P. Young, D. Hittle, C. Anderson, and D. Hodgson, "MIMO Robust Control for HVAC Systems," *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, vol. 16, no. 3, pp. 475–483, May 2008.

- [45] S. A. K. Al-Assadi, R. V. Patel, M. Zaheer-uddin, M. S. Verma, and J. Breitingner, "Robust decentralized control of HVAC systems using -performance measures," *J. Franklin Inst.*, vol. 341, no. 7, pp. 543–567, Nov. 2004.
- [46] G. P. Henze, C. Felsmann, and G. Knabe, "Evaluation of optimal control for active and passive building thermal storage," *Int. J. Therm. Sci.*, vol. 43, no. 2, pp. 173–183, Feb. 2004.
- [47] E. M. Greensfelder, G. P. Henze, and C. Felsmann, "An investigation of optimal control of passive building thermal storage with real time pricing," *J. Build. Perform. Simul.*, vol. 4, no. 2, pp. 91–104, Jun. 2011.
- [48] J. Nishiguchi, T. Konda, and R. Dazai, "Data-driven optimal control for building energy conservation." pp. 116–120, 2010.
- [49] M. Mossolly, K. Ghali, and N. Ghaddar, "Optimal control strategy for a multi-zone air conditioning system using a genetic algorithm," *Energy*, vol. 34, no. 1, pp. 58–66, Jan. 2009.
- [50] Y. Yan, J. Zhou, Y. Lin, W. Yang, P. Wang, and G. Zhang, "Adaptive optimal control model for building cooling and heating sources," *Energy Build.*, vol. 40, no. 8, pp. 1394–1401, Jan. 2008.
- [51] R. Z. Homod, K. S. M. Sahari, H. A. F. Almurib, and F. H. Nagi, "Gradient auto-tuned Takagi–Sugeno Fuzzy Forward control of a HVAC system using predicted mean vote index," *Energy Build.*, vol. 49, pp. 254–267, Jun. 2012.
- [52] Jian Liang and Ruxu Du, "Thermal comfort control based on neural network for HVAC application," in *Proceedings of 2005 IEEE Conference on Control Applications, 2005. CCA 2005.*, 2005, pp. 819–824.
- [53] R. E. H. G.P. Henze, "Control of air-cooled chiller condenser fans using clustering neural networks," *ASHRAE Trans.*, vol. 108, no. 2, pp. 232–244, 2002.
- [54] M. M. Gouda, S. Danaher, and C. P. Underwood, "Quasi-adaptive fuzzy heating control of solar buildings," *Build. Environ.*, vol. 41, no. 12, pp. 1881–1891, Dec. 2006.
- [55] Xuquan Li, Zhigang Shi, and Songtao Hu, "A novel control method of a variable volume air conditioning system for indoor thermal environment," in *2010 2nd International Conference on Computer Engineering and Technology*, 2010, vol. 2, pp. V2–566–V2–570.
- [56] T. I. Salsbury, "A new pulse modulation adaptive controller (PMAC) applied to HVAC systems," *Control Eng. Pract.*, vol. 10, no. 12, pp. 1357–1370, Dec. 2002.
- [57] J. E. Seem, "A New Pattern Recognition Adaptive Controller with Application to HVAC Systems," *Automatica*, vol. 34, no. 8, pp. 969–982, Aug. 1998.
- [58] M. Zaheer-uddin, S. Al-Assadi, and R. Patel, "Decentralized preview control for multiple disturbance rejection in HVAC systems," *Control Eng. Pract.*, vol. 2, no. 6, pp. 989–1000, Dec. 1994.
- [59] S.-H. Cho and M. Zaheer-uddin, "An experimental study of multiple parameter switching control for radiant floor heating systems," *Energy*, vol. 24, no. 5, pp. 433–444, May 1999.

- [60] S. Liu and G. P. Henze, “Experimental analysis of simulated reinforcement learning control for active and passive building thermal storage inventory,” *Energy Build.*, vol. 38, no. 2, pp. 148–161, Feb. 2006.
- [61] M. Palhinha, “Sistemas de sombreamento em arquitectura: Proposta de um novo método de concepção e dimensionamento,” Instituto Superior Técnico - Universidade Técnica de Lisboa, 2009.
- [62] G. Yun, K. C. Yoon, and K. S. Kim, “The influence of shading control strategies on the visual comfort and energy demand of office buildings,” *Energy Build.*, vol. 84, pp. 70–85, Jul. 2014.
- [63] ANSI/ASHRAE, “Standard 140-2007, Standard Method of Test for the Evaluation of Building Energy Analysis Computer Programs,” 2007.
- [64] P. Ihm, M. Krarti, and G. P. Henze, “Development of a thermal energy storage model for EnergyPlus,” *Energy Build.*, vol. 36, no. 8, pp. 807–814, Aug. 2004.
- [65] C. Adam and P. Andre, “Ice storage system (ISS) : phase change modelling (TRNSYS 15). Simulation of a typical HVAC primary plant equipped with an ice sotrage unit.,” Dec. 2002.
- [66] A. O. Garcia, “Modeling Solar Thermal Systems with DesignBuilder.” [Online]. Available: [http://web.cut.ac.cy/wp-content/uploads/sites/13/2014/08/1-3-AND-3-1-a-BISTS\\_MoldelingSolarThermalSystemsWithDesignBuilder.pdf](http://web.cut.ac.cy/wp-content/uploads/sites/13/2014/08/1-3-AND-3-1-a-BISTS_MoldelingSolarThermalSystemsWithDesignBuilder.pdf). [Accessed: 07-Dec-2015].
- [67] M. P. J. Bakić, Vukman V., Milada L. Pezo and and N. S. M. Valentina M. Turanjanin, Biljana S. Vučićević, “Technical analysis of Photovoltaic/Wind systems with hydrogen storage.” [Online]. Available: <http://www.doiserbia.nb.rs/img/doi/0354-9836/2012/0354-98361200132B.pdf>. [Accessed: 07-Dec-2015].
- [68] A. M. Syed, A. S. Fung, V. I. Ugursal, and H. Taherian, “Analysis of PV/wind potential in the Canadian residential sector through high-resolution building energy simulation,” *Int. J. Energy Res.*, vol. 33, no. 4, pp. 342–357, Mar. 2009.
- [69] J. L. M. Hoes, P., Loonen, R.C.G.M., Trcka, M. & Hensen, “Performance prediction of advanced building controls in the design phase using ESP-r, BCVTB and Matlab,” in *Proceeding of the 1<sup>o</sup> IBPSA-England Conference Building Simulation and Optimization(BSO12)*, 2012, pp. 229–236.
- [70] Z. Liu, Y., Pan, Y., & Huang, “Simulation-based receding-horizon supervisory control of HVAC system,” in *Proceedings of 13th International IBPSA Conference*, 2013, pp. 1492–1498.
- [71] ADENE - Agência para a Energia, “Legislação | Sistema de Certificação Energética dos Edifícios.” [Online]. Available: <http://www.adene.pt/sce/legislacao-0>. [Accessed: 02-Dec-2015].
- [72] “Preços de referência no mercado liberalizado de energia elétrica e gás natural em Portugal continental,” 2015. [Online]. Available: [http://www.erse.pt/pt/Simuladores/Documents/Pre%C3%A7osRef\\_BTN.pdf](http://www.erse.pt/pt/Simuladores/Documents/Pre%C3%A7osRef_BTN.pdf). [Accessed: 29-Oct-2015].

- [73] P. Costa, “Atlas do Potencial Eólico para Portugal Continental,” Jun. 2004.
- [74] “SolarGIS: Free solar radiation maps download page - GHI.” [Online]. Available: <http://solargis.info/doc/free-solar-radiation-maps-GHI#P>. [Accessed: 22-Nov-2015].
- [75] “PV potential estimation utility.” [Online]. Available: <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php?lang=en&map=europe>. [Accessed: 29-Oct-2015].
- [76] timeanddate.com, “Sunrise and sunset times in Porto, December 2015,” 2015. [Online]. Available: <http://www.timeanddate.com/sun/portugal/porto?month=12&year=2015>. [Accessed: 29-Oct-2015].
- [77] G. Fletcher, *The Guide to Photovoltaic System Installation*. Cengage Learning, 2013.
- [78] Ministério do Ambiente ordenamento do território e energia, “Decreto-Lei n.º 153/2014.” [Online]. Available: <https://dre.pt/application/file/58428682>. [Accessed: 23-Nov-2015].
- [79] Ministério do Ambiente ordenamento do território e energia, “Enquadramento do novo regime de Produção Distribuída.” [Online]. Available: <http://www.futursolutions.pt/docs/EnquadProdDistri.pdf>. [Accessed: 23-Nov-2015].
- [80] O. do M. I. de E. (OMIE), “Operador do Mercado Ibérico de Energia (OMIE) - Outubro 2015.” [Online]. Available: <http://www.omie.es/files/flash/ResultadosMercado.swf>. [Accessed: 23-Nov-2015].
- [81] B. Crozier, “Enhancing the performance of oversized plant (AG 1/2000),” *BSRIA*, p. 119, 2000.
- [82] Sacramento Municipal utility district (SMUD), “Commercial Energy Systems - Compare - Installed Costs - Chillers.” [Online]. Available: <http://smud.apogee.net/comsuite/content/ces/?id=1084>. [Accessed: 30-Nov-2015].
- [83] International Energy Agency (IEA), “Trends 2015 in photovoltaic applications.” [Online]. Available: [http://www.iea-pvps.org/fileadmin/dam/public/report/national/IEA-PVPS\\_-\\_Trends\\_2015\\_-\\_MedRes.pdf](http://www.iea-pvps.org/fileadmin/dam/public/report/national/IEA-PVPS_-_Trends_2015_-_MedRes.pdf). [Accessed: 30-Nov-2015].
- [84] The International Renewable Energy Agency (IRENA), “Renewable power generation costs in 2014.” [Online]. Available: [http://www.irena.org/documentdownloads/publications/irena\\_re\\_power\\_costs\\_2014\\_report.pdf](http://www.irena.org/documentdownloads/publications/irena_re_power_costs_2014_report.pdf). [Accessed: 30-Nov-2015].
- [85] Wind Measurement International, “Operational and Maintenance Costs for Wind Turbines.” [Online]. Available: <http://www.windmeasurementinternational.com/wind-turbines/om-turbines.php>. [Accessed: 30-Nov-2015].
- [86] Southface Energy Institute, “Solar Electric Costs, Paybacks and Maintenance.” [Online]. Available: <http://www.southface.org/learning-center/library/solar-resources/solar-electric-costs-paybacks-and-maintenance>. [Accessed: 01-Dec-2015].

- [87] “CALMAC global leader in energy storage.” [Online]. Available: <http://www.calmac.com/>. [Accessed: 01-Dec-2015].
- [88] SunPower, “SunPower Solar Panels.” [Online]. Available: <http://global.sunpower.com/high-efficiency-solar-technology/solar-panels/>. [Accessed: 01-Dec-2015].
- [89] M. Myers, “New research blows away claims that ageing wind farms are a bad investment.” [Online]. Available: [http://www3.imperial.ac.uk/newsandeventspggrp/imperialcollege/newssummary/news\\_20-2-2014-9-18-49#](http://www3.imperial.ac.uk/newsandeventspggrp/imperialcollege/newssummary/news_20-2-2014-9-18-49#). [Accessed: 01-Dec-2015].
- [90] “PO SEUR - Programa Operacional Sustentabilidade e Eficiência no Uso de Recursos.” [Online]. Available: <https://poseur.portugal2020.pt/pt/>. [Accessed: 01-Dec-2015].
- [91] K. S. Q. L. Amado, “Análise do efeito de implementação de armazenamento térmico em banco de gelo e armazenamento elétrico em baterias Sódio-Enxofre (NaS) sobre o custo de exploração de edifícios de serviços.” 01-Jan-2015.

## Anexo A – Perfis de utilização do chiller

- **Caso 1 – Otimizado**

<p>Schedule:Compact,  Main Chiller Setpoint Temp Schedule,  Temperature,  Through: 3/25,  For: AllDays,  Until: 24:00,  7.22,  Through: 10/25,  For: AllDays,  Until: 08:00,  7.22,  Until: 10:00,  7.22,  Until: 13:00,  7.22,  Until: 24:00,  7.22,  Through: 12/31,  For: AllDays,  Until: 24:00,  7.22;</p>	<p>Schedule:Compact,  Main Chiller-Charging Setpoint Temp  Schedule,  Temperature,  Through: 3/25,  For: AllDays,  Until: 24:00,  7.22,  Through: 10/25,  For: AllDays,  Until: 08:00,  7.22,  Until: 10:00,  7.22,  Until: 13:00,  7.22,  Until: 24:00,  7.22,  Through: 12/31,  For: AllDays,  Until: 24:00,  7.22;</p>
---	---

- **Caso 2 – Otimizado**

<p>Schedule:Compact,  Main Chiller Setpoint Temp Schedule, !-  Name  Temperature,  Through: 3/25,  For: AllDays,  Until: 24:00,  7.22,  Through: 10/25,  For: AllDays,  Until: 08:00,  7.22,  Until: 10:30,  7.22,  Until: 13:00,  99,  Until: 19:30,  7.22,  Until: 21:00,  99,  Until: 24:00,  99,  Through: 12/31,  For: AllDays,  Until: 24:00,  7.22;</p>	<p>Schedule:Compact,  Main Chiller-Charging Setpoint Temp  Schedule,  Temperature,  Through: 3/15,  For: AllDays,  Until: 24:00,  99,  Through: 10/25,  For: AllDays,  Until: 08:00,  -5.0,  Until: 22:00,  99,  Until: 24:00,  -5.0,  Through: 12/31,  For: AllDays,  Until: 24:00,  99;</p>
--	---

- **Caso 3 – Otimizado**

<p>Schedule: Compact,  Main Chiller Setpoint Temp Schedule,  Temperature,  Through: 3/25,  For: AllDays,  Until: 24:00,  7.22,  Through: 10/25,  For: AllDays,  Until: 08:00,  7.22,  Until: 10:30,  7.22,  Until: 13:00,  99,  Until: 19:30,  7.22,  Until: 21:00,  99,  Until: 24:00,  99,  Through: 12/31,  For: AllDays,  Until: 24:00,  7.22;</p>	<p>Schedule: Compact,  Main Chiller-Charging Setpoint Temp  Schedule,  Temperature,  Through: 3/15,  For: AllDays,  Until: 24:00,  99,  Through: 10/25,  For: AllDays,  Until: 08:00,  -5.0,  Until: 22:00,  99,  Until: 24:00,  -5.0,  Through: 12/31,  For: AllDays,  Until: 24:00,</p>
--	---



• **Caso 4 – Otimizado**

<p>Schedule:Compact,  Main Chiller Setpoint Temp Schedule,  Temperature,  Through: 3/25,  For: AllDays,  Until: 24:00,  7.22,  Through: 10/25,  For: AllDays,  Until: 08:00,  99,  Until: 10:00,  7.22,  Until: 13:00,  7.22,  Until: 24:00,  7.22,  Through: 12/31,  For: AllDays,  Until: 24:00,  7.22;</p>	<p>Schedule:Compact,  Main Chiller-Charging Setpoint Temp  Schedule,  Temperature,  Through: 3/15,  For: AllDays,  Until: 24:00,  99,  Through: 10/25,  For: AllDays,  Until: 08:00,  -5.0,  Until: 22:00,  99,  Until: 24:00,  -5.0,  Through: 12/31,  For: AllDays,  Until: 24:00,  99;</p>
---	---

• **Caso 5 – Otimizado**

<p>Schedule:Compact,  Main Chiller Setpoint Temp Schedule,  Temperature,  Through: 3/25,  For: AllDays,  Until: 24:00,  7.22,  Through: 10/25,  For: AllDays,  Until: 08:00,  7.22,  Until: 10:30,  99,  Until: 13:00,  99,  Until: 24:00,  7.22,  Through: 12/31,  For: AllDays,  Until: 24:00,  7.22;</p>	<p>Schedule:Compact,  Main Chiller-Charging Setpoint Temp  Schedule,  Temperature,  Through: 3/15,  For: AllDays,  Until: 24:00,  99,  Through: 10/25,  For: AllDays,  Until: 08:00,  -5.0,  Until: 22:00,  99,  Until: 24:00,  -5.0,  Through: 12/31,  For: AllDays,  Until: 24:00,  99;</p>
---	---

## Anexo B – Preços dos bancos de gelo [91]

Part#	Description	List Price	Price
CALM-1500C	Model 1500CSF (same end connections), 1500CRF (opposite end connections) ICE BANK Tanks. 486 nominal ton-hours each, (2) - 4" flanged connections, 89"(w) x 273"(L) x 102"(H). Price is per tank for quantities of six or less Model 1500C Tanks. For quantiti	\$58.000,00	\$28.450,74
CALM-1190C-4F	Model 1190C4F ICE Bank Tank. 162 nominal ton-hours, (2) 4" flanged connections, 89" diameter x 102" tall. A 1220C, 1190C and 1098C lifting bar is required for Model 1190C tanks. Model 1190C tanks can be installed in groups of two, three or four. Group	\$19.800,00	\$9.712,49
CALM-1190C-TB	Add for total burial (1190C-only). Buried tank option allows one (1) foot below grade burial of tank on a concrete pad. A layer of wood chips can be used to cover the tank. The price includes thicker tank walls, a center support, and fill port extension	\$2.300,00	\$1.128,22
CALM-1190C-MAT	Add for Mixair Option. Mixair tank adds the ability for air agitation to occur during discharge. See CALMAC catalog for discharge performance details. Models with Mixair require properly sized air blower and can only use Ultrasonic inventory meters. Pr	\$1.250,00	\$613,16
CALM-1190A	Model 1190A ICE BANK Tank 162 nominal ton-hours, (2) 2" flanged connections, 89" diameter x 102" tall, fork lift base. Model A tanks cannot be assembled into groups.	\$18.600,00	\$9.123,86
CALM-1190A-ST	Model 1190A Salt Tank Same as a Model 1190A tank but includes necessary hardware to operate with selected salts for freeze points below 32 deg. F. Includes stainless steel mixing pump factory mounted. (Electric service required, extra and installed by C	\$21.000,00	\$10.301,13
CALM-1190A-AS28ES	Add for salt (28 degree eutectic salt - freeze point depressant). For inclusion in 1190A salt tank. Shipped separately and installed by Contractor or Authorized Government Reseller. See manual for ton-hours available.	\$1.400,00	\$686,74
CALM-1190A-AS12ES	Add for salt (12 degree eutectic salt - freeze point depressant) For inclusion in 1190A salt tank. Shipped separately and installed by Contractor or Authorized Government Reseller. See manual for ton-hours available.	\$4.000,00	\$1.962,12

Part#	Description	List Price	Price
CALM-1098C-2F	Model 1098C2F Tank. 98 nominal ton-hours, (2) 4" flanged connections, 89" diameter x 68" tall. A 1220C, 1190C and 1098C lifting bar is required for Model 1098C tanks. Model 1098C tanks can be installed in groups of two, three or four. Groupings of fou	\$14.300,00	\$7.014,58
CALM-1098C-3F	Model 1098C3F ICE BANK Tank. 98 nominal ton-hours, (3) 4" flanged connections, 89" diameter x 68" tall. A 1220C, 1190C and 1098C lifting bar is required for Model 1098C tanks. Model 1098C tanks can be installed in groups of two, three or four. Groupin	\$14.400,00	\$7.063,63
CALM-1098C-4F	Model 1098C4F ICE BANK Tank. 98 nominal ton-hours, (4) 4" flanged connections, 89" diameter x 68" tall. A 1220C, 1190C and 1098C lifting bar is required for Model 1098C tanks. Model 1098C tanks can be installed in groups of two, three or four. Groupin	\$14.500,00	\$7.112,68
CALM-1500C-7	Additional Model 1500C ICE BANK tanks over six per project. Price is per tank for greater than six Model 1500C tanks on the same project. A 1500C & 1320C lifting bar is required for Model 1500C tanks.	\$56.600,00	\$27.764,00
CALM-1098C-TB	Add for Total Burial (1098C-only). Buried tank option allows one (1) foot below grade burial of tank on a concrete pad. A layer of wood chips can be used to cover the tank. The price includes thicker tank walls, a center support, and fill port extension	\$1.950,00	\$956,53
CALM-1098C-MAT	Add for mixair (C or A Models). Mixair tank adds the ability for air agitation to occur during discharge. See CALMAC catalog for discharge performance details. Models with Mixair require properly sized air blower and can only use Ultrasonic inventory me	\$1.150,00	\$564,11
CALM-1098A	Model 1098A ICE BANK Tank 98 nominal ton-hours, (2) 2" flanged connections, 89" diameter x 68" tall, fork lift base. Model A tanks cannot be assembled into groups.	\$13.300,00	\$6.524,05

Part#	Description	List Price	Price
CALM-1098A-ST	Model 1098A Salt tank Same as Model 1098A tank but includes necessary hardware to operate with selected salts for freeze points below 32 deg. F. Includes stainless steel mixing pump factory mounted. (Electric service required, extra and installed by Co	\$15.700,00	\$7.701,32
CALM-1098A-AS28	Add for salt (28 degree) For inclusion in 1098A salt tank, shipped separately and installed by Contractor or Authorized Government Reseller. See manual for ton-hours available.	\$850,00	\$416,95
CALM-1098A-AS12	Add for salt (12 degree) For inclusion in 1098A salt tank, shipped separately and installed by Contractor or Authorized Government Reseller. See manual for ton-hours available.	\$2.400,00	\$1.177,27
CALM-1105C-2F	Model 1105C2F Tank. 100 nominal ton hours, (2) 4" flanged connections, 74" diameter x 102" tall. A 1220C, 1190C and 1098C lifting bar is required for Model 1105C tanks. Model 1105C tanks can be installed in groups of two, three or four. Groupings of t	\$15.300,00	\$7.505,11
CALM-1105C-3F	Model 1105C3F ICE BANK Tank. 100 nominal ton-hours, (3) 4" flanged connections, 74" (w) x 76" diameter x 102" tall. A 1220C, 1190C and 1098C lifting bar is required for Model 1105C tanks. Model 1105C tanks can be installed in groups of two, three or fo	\$15.400,00	\$7.554,16
CALM-1105C-4F	Model 1105C4F ICE BANK Tank. 100 nominal ton-hours, (4) 4" flanged connections, 74" diameter x 102" tall. A 1220C, 1190C and 1098C lifting bar is required for Model 1105C tanks. Model 1105C tanks can be installed in groups of two, three or four. Groupi	\$15.500,00	\$7.603,22
CALM-1105C-U4F	Model 1105CU4F ICE BANK Tank. 100 nominal ton-hours, (4) 4" flanged connections, 74" diameter x 102" tall. A 1220C, 1190C and 1098C lifting bar is required for Model 1105C tanks. Model 1105C tanks can be installed in groups of two, three or four. Grou	\$16.300,00	\$7.995,64
CALM-1500C-TB	Add for Total Burial. Buried tank option allows one (1) foot below grade burial of tank on a concrete pad. A layer of wood chips can be used to cover the tank. The price includes thicker tank walls, a center support, one set of shut off valves with acce	\$6.300,00	\$3.090,34

Part#	Description	List Price	Price
CALM-1105A	Model 1105A ICE BANK Tank 100 nominal ton-hours, (2) 2" flanged connections, 74" diameter x 102" tall, fork lift base. Model A tanks cannot be assembled into groups.	\$13.800,00	\$6.769,31
CALM-1082C-2F	Model 1082C2F ICE BANK Tank. 82 nominal ton-hours, (2) 4" flanged connections, 74"(w) x 76" (L) x 85" tall. A 1220C, 1190C and 1098C lifting bar is required for Model 1082C tanks. Model 1082C tanks can be installed in groups of two, three or four. Gro	\$13.300,00	\$6.524,05
CALM-1082C-3F	Model 1082C3F ICE BANK Tank. 82 nominal ton-hours, (3) 4" flanged connections, 74"(w) x 76" (L) x 85" tall. A 1220C, 1190C and 1098C lifting bar is required for Model 1082C tanks. Model 1082C tanks can be installed in groups of two, three or four. Gro	\$13.400,00	\$6.573,10
CALM-1082C-4F	Model 1082C4F ICE BANK Tank. 82 nominal ton-hours, (4) 4" flanged connections, 74"(w) x 76" (L) x 85" tall. A 1220C, 1190C and 1098C lifting bar is required for Model 1105C tanks. Model 1082C tanks can be installed in groups of two, three or four. Grou	\$13.500,00	\$6.622,16
CALM-1082C-U4F	Model 1082CU4F ICE BANK Tank. 82 nominal ton-hours, (4) 4" flanged connections, 74"(w) x 76" (L) x 85" tall. A 1220C, 1190C and 1098C lifting bar is required for Model 1082C tanks. Model 1105C tanks can be installed in groups of two, three or four. Gr	\$14.200,00	\$6.965,53
CALM-1082A	Model 1082A ICE BANK Tank. 82 nominal ton-hours, (2) 2" flanged connections, 74"(w) x 76" (L) x 85" tall, fork lift base. Model A tanks cannot be assembled into groups	\$11.800,00	\$5.788,25
CALM-1082C-MAT	Add for Mixair. Mixair tank adds the ability for air agitation to occur during discharge. See CALMAC catalog for discharge performance details. Models with Mixair require properly sized air blower and can only use Ultrasonic inventory meters. Price for	\$900,00	\$441,48
CALM-1082A-ST	Model 1082A Salt tank Same as Model 1082A tank but includes necessary hardware to operate with selected salts for freeze points below 32 deg. F. Includes stainless steel mixing pump factory mounted. (Electric service required, extra and installed by Con	\$14.200,00	\$6.965,53

Part#	Description	List Price	Price
CALM-1082A-AS28	Add for salt (28 degree) For inclusion in 1082A salt tank, shipped separately and installed by Contractor or Authorized Government Reseller. See manual for ton-hours available.	\$750,00	\$367,90
CALM-1082A-AS12	Add for salt (12 degree) For inclusion in 1082A salt tank, shipped separately and installed by Contractor or Authorized Government Reseller. See manual for ton-hours available.	\$2.000,00	\$981,06
CALM-1500C-MAT	Add for Mixair Tank Option. Mixair tank adds the ability for air agitation to occur during discharge. See CALMAC catalog for discharge performance details. Models with Mixair require properly sized air blower and can only use Ultrasonic meters. Price f	\$3.800,00	\$1.864,01
CALM-1045C-2F	Model 1045C2F ICE BANK Tank. 41 nominal ton-hours, (2) 4" flanged connections, 74"(w) x 76"(L) x 49" tall. A 1220C, 1190C and 1098C lifting bar is required for Model 1045C tanks. Model 1045C tanks can be installed in groups of two, three or four. Grou	\$9.700,00	\$4.758,14
CALM-1045C-3F	Model 1045C3F ICE BANK Tank. 41 nominal ton-hours, (3) 4" flanged connections, 74"(w) x 76"(L) x 49" tall. A 1220C, 1190C and 1098C lifting bar is required for Model 1045C tanks. Model 1045C tanks can be installed in groups of two, three or four. Grou	\$9.800,00	\$4.807,19
CALM-1045C-4F	Model 1045C4F ICE BANK Tank. 41 nominal ton-hours, (4) 4" flanged connections, 74"(w) x 76"(L) x 49" tall. A 1220C, 1190C and 1098C lifting bar is required for Model 1045C tanks. Model 1045C tanks can be installed in groups of two, three or four. Grou	\$9.900,00	\$4.856,25
CALM-1045C-U4F	Model 1045CU4F ICE BANK Tank. 41 nominal ton-hours, (4) 4" flanged connections, 74"(w) x 76" (L) x 85" tall. A 1220C, 1190C and 1098C lifting bar is required for Model 1045C tanks. Model 1045C tanks can be installed in groups of two, three or four. Gr	\$10.800,00	\$5.297,72
CALM-1045A	Model 1045A ICE BANK Tank 45 nominal ton-hours, (2) 2" flanged connections, 74"(w) x 76" (L) x 49" tall, fork lift base. Model A tanks cannot be assembled into groups.	\$8.500,00	\$4.169,50
CALM-LB1	Lifting Bar (For 1190C, 1098C, 1105C, 1082C, 1045C Tanks)	\$350,00	\$171,69
CALM-LB2	Lifting Bar (For Model 1320C and 1500C Tanks)	\$800,00	\$392,42
CALM-GMS	Glycol Management System (Glycol make up system)	\$7.700,00	\$3.777,08

Part#	Description	List Price	Price
CALM-SIIM	Standard Ice Inventory Meter (One per project, std tanks)	\$2.300,00	\$1.128,22
CALM-UIIM	Ultrasonic Ice Inventory Meter (One per project Mix air tanks)	\$5.300,00	\$2.599,81
CALM-1320C	Model 1320CSF (same end connections), 1320CRF (opposite end connections) IceBank Tanks. 324 nominal ton-hours each, (2) - 4" flanged connections, 89"(w) x 183"(L) x 102"(H). A 1500C & 1320C lifting bar is required for Model 1320C tanks.	\$38.200,00	\$18.738,25
CALM-3FLEX	3' flex connector for model A Tank (Replacement part for older tanks)	\$550,00	\$269,79
CALM-4FLEX	4' flex connector for model A Tank (Replacement part for older tanks)	\$600,00	\$294,32
CALM-5FLEX	5' flex connector for model A Tank (Replacement part for older tanks)	\$650,00	\$318,84
CALM-SOVK	Model C Tank Shut-off Valve Kit (2- 4" flanged lug type ball shut off valves for field installation)	\$950,00	\$466,00
CALM-BVK	Model C Tank Buried Valve Kit (2-V)	\$1.600,00	\$784,85
CALM-1190C-EJK	1190C Expansion Joint Kit (4 packs). Required if assembling more than (3) 1190C tanks for expansion provisions. Field installed, insulated by others.	\$950,00	\$466,00
CALM-LHL	Lifting Hook Lid (option for A Style tanks only)	\$370,00	\$181,50
CALM-CT	Coolant Tester	\$460,00	\$225,64
CALM-5MB	5.0 hp Mixair Blower (Models with Mixair require properly sized air blower and can only use Ultrasonic inventory meters.)	\$11.200,00	\$5.493,94
CALM-75MB	7.5 hp Mixair Blower (Models with Mixair require properly sized air blower and can only use Ultrasonic inventory meters.)	\$8.300,00	\$4.071,40
CALM-1320C-TB	Add for Total Burial. Buried tank option allows one (1) foot below grade burial of tank on a concrete pad. A layer of wood chips can be used to cover the tank. The price includes thicker tank walls, a center support, one set of shut off valves with acce	\$4.800,00	\$2.354,54
CALM-10MB	10.0 hp Mixair Blower (Models with Mixair require properly sized air blower and can only use Ultrasonic inventory meters.)	\$11.800,00	\$5.788,25
CALM-ASK	Aluminum Skin Kit (replacement part) (Required for mix air tank. Contact Contractor or Authorized Government Reseller for proper size.)	\$1.000,00	\$490,53
CALM-AT	Algicide treatment (pint) one / module / 2 years. First 2 year treatment included with new tanks.	\$55,00	\$26,98
CALM-TR	Transducer (replacement part for inventory meter)	\$1.100,00	\$539,58

Part#	Description	List Price	Price
CALM-1320C-MAT	Add for Mixair Tank Option. Mixair tank adds the ability for air agitation to occur during discharge. See CALMAC catalog for discharge performance details. Models with Mixair require properly sized air blower and can only use Ultrasonic meters. Price f	\$2.500,00	\$1.226,32
CALM-1190C-2F	Model 1190C2F ICE BANK Tank. 162 nominal ton-hours, (2) 4" flanged connections, 89" diameter x 102" tall. A 1220C, 1190C and 1098C lifting bar is required for Model 1190C tanks. Model 1190C tanks can be installed in groups of two, three or four. Groupi	\$19.600,00	\$9.614,39
CALM-1190C-3F	Model 1190C3F ICE BANK Tank. 162 nominal ton-hours, (2) 4" flanged connections, 89" diameter x 102" tall. A 1220C, 1190C and 1098C lifting bar is required for Model 1190C tanks. Model 1190C tanks can be installed in groups of two, three or four. Groupi	\$19.700,00	\$9.663,44