

Estudo Térmico e Medidas de Promoção de Eficiência Energética numa Nave Oficial

ANDRÉ COSTA MEDEIROS
(Licenciado em Engenharia Mecânica)

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, na Área de Especialização de Energia, Refrigeração e Climatização

Orientadores:

Doutora Cláudia Sofia Séneca da Luz Casaca
Doutor Gonçalo Nuno de Oliveira Duarte

Júri:

Presidente: Doutor Pedro Miguel de Abreu e Silva

Vogais:

Doutor Nuno Ricardo Piedade Antunes Serra
Doutor Gonçalo Nuno de Oliveira Duarte

Maio de 2025

Estudo Térmico e Medidas de Promoção de Eficiência Energética numa Nave Oficinal

ANDRÉ COSTA MEDEIROS
(Licenciado em Engenharia Mecânica)

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, na Área de Especialização de Energia, Refrigeração e Climatização

Orientadores:

Doutora Cláudia Sofia Séneca da Luz Casaca, ISEL/IPL
Doutor Gonçalo Nuno de Oliveira Duarte, ISEL/IPL

Júri:

Presidente: Doutor Pedro Miguel de Abreu e Silva, ISEL/IPL

Vogais:

Doutor Nuno Ricardo Piedade Antunes Serra, ISEL/IPL
Doutor Gonçalo Nuno de Oliveira Duarte, ISEL/IPL

Maio de 2025

Agradecimentos

Quero expressar os meus agradecimentos aos meus orientadores, por todo o apoio e esclarecimentos prestados ao longo deste trabalho.

Ao Engenheiro Gonçalo Gonçalves da CARRIS, por toda a disponibilidade e celeridade em receber-me na nave oficial quando necessitei.

Aos meus amigos e namorada por toda a ajuda que me deram não só no decorrer deste trabalho, mas também ao longo de todo o meu ciclo de estudos, desde a licenciatura.

Por último, mas não menos importante, um especial obrigado aos meus pais por me terem proporcionado, desde sempre, as condições e o apoio que me permitiram chegar até aqui e ser a pessoa que sou hoje, a eles dedico este trabalho.

Declaração de integridade

Declaro que esta dissertação é o resultado da minha investigação pessoal e independente. O seu conteúdo é original e todas as fontes listadas nas referências bibliográficas foram consultadas e estão devidamente mencionadas no texto. Mais declaro que todas as referências científicas e técnicas relevantes para o desenvolvimento do trabalho estão devidamente citadas e constam das referências bibliográficas.

O autor

André Costa Medeiros

Lisboa, 20 de maio de 2025

Estudo Térmico e Medidas de Promoção de Eficiência Energética numa Nave Oficinal

Resumo

A adoção de práticas sustentáveis tem vindo a ser um tema crescente nos últimos anos. Num contexto nacional, a utilização racional de energia e o desempenho térmico dos edifícios é especialmente importante, dada a dependência energética que Portugal possui e a pobreza energética do parque habitacional. Esta pobreza estende-se a outras tipologias de edifícios como os industriais, muitas vezes devido à sua idade e práticas construtivas adotadas na época.

A nave oficinal em estudo apresenta desafios em termos de conforto térmico e qualidade do ar interior, resultantes das suas características construtivas e da obsolescência dos sistemas de climatização. Foram propostas medidas para o aumento do conforto térmico e qualidade do ar interior tendo em conta a promoção da eficiência energética. Foi elaborada uma caracterização térmica do edifício no seu estado atual que levou a propostas de melhoria ao mesmo, sendo estas analisadas numericamente com recurso ao programa de simulação dinâmica HAP, desenvolvido pela Carrier. As melhorias consistem na aplicação de isolamento na cobertura, na fachada sul e a implementação de vãos envidraçados e portões de acesso que possuem um desempenho térmico superior. Para este efeito foi utilizado o EPS, variando a sua espessura, e vãos envidraçados e portões de acesso com um coeficiente global de transmissão térmica inferior.

Foi determinado o caudal de ar novo mínimo necessário e dimensionada uma unidade de tratamento de ar para as duas medidas propostas com o maior impacto térmico para o edifício, assim como uma proposta para os pontos de insuflação, extração e extração localizada para a medida que apresenta o maior impacto térmico.

Finalmente, analisou-se o consumo energético da instalação variando o caudal de ar novo a insuflar, contemplando os ventiladores, chiller e a bomba de calor, constatando que o menor consumo para o chiller acontece para 80% de ar novo devido ao free-cooling.

Palavras-chave: Estudo térmico, nave oficinal, eficiência energética, AVAC, consumo energético

Thermal Study and Measures to Promote Energy Efficiency in a Workshop

Abstract

The adoption of sustainable practices has been a growing theme in recent years. In a national context, the rational use of energy and the thermal performance of buildings is especially important, given Portugal's energy dependence and the energy poverty of its housing stock. This poverty extends to other types of buildings such as industrial buildings, often due to their age and the construction practices adopted at the time.

The workshop under study presents challenges in terms of thermal comfort and indoor air quality, resulting from its constructive characteristics and the obsolescence of the air conditioning systems. Measures were proposed to increase thermal comfort and indoor air quality, considering the promotion of energy efficiency. A thermal characterization of the building in its current state was carried out, leading to proposals for improvements, which were analyzed numerically using the dynamic simulation program HAP, developed by Carrier. The improvements consist of applying insulation to the roof and south façade and implementing glazed openings and access gates that have superior thermal performance. For this purpose, EPS was used, varying its thickness, and glazed openings and access gates with a lower overall coefficient of thermal transmission.

The minimum outside air flow required was determined and an air handling unit was sized for the two proposed measures with the greatest thermal impact on the building, as well as a proposal for the supply, extraction and localized extraction points for the measure with the greatest thermal impact.

Finally, the energy consumption of the installation was analyzed by varying the flow of outside air to be blown in, including the fans, chiller and heat pump, and it was found that the lowest consumption for the chiller occurs at 80% outside air due to free-cooling.

Keywords: Thermal study, workshop, energy efficiency, , HVAC, energy consumption

Lista de Símbolos e de siglas

Alfabeto romano

e_{EPS}	Espessura de EPS	[m]
$e_{Isolante}$	Espessura do Elemento Isolante	[m]
g	Fator solar\	[Adimensional]
I_T	Inércia Térmica	[kg/m ²]
\dot{Q}_L	Calor Latente	[W]
\dot{Q}_s	Calor Sensível	[W]
R	Resistência Térmica	[m ² .K/W]
T_{EXT}	Temperatura Exterior	[°C]
U	Coeficiente global de transmissão de calor	[W/m ² .K]
$\dot{V}_{adotado}$	Caudal de ar novo adotado	[L/s]
$\dot{V}_{an,edif}$	Caudal de ar novo obtido através do critério do edifício	[L/s]
$\dot{V}_{an,ocup}$	Caudal de ar novo obtido através do critério da ocupação	[L/s]
\dot{V}_{an}	Caudal de ar novo	[L/s]
$\dot{V}_{an,\epsilon}$	Caudal de ar novo afetado pela eficácia de ventilação	[L/s]
\dot{V}_{inf}	Caudal de ar por infiltração	[L/s.m ²]

Alfabeto grego

ϵ_v	Eficácia de ventilação	[Adimensional]
ϵ	Emissividade	[Adimensional]
λ	Condutibilidade térmica	[W/m.K]

Siglas

ADENE	Agência para Energia
AQS	Aquecimento de Águas Sanitárias
AVAC	Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado

BC	Bomba de Calor
CAE	Custo Anual Equivalente
CE	Certificado Energético
CEF	Consumo de Energia Final
CEIT	Custo de Eficiência de Isolamento Térmico
CEP	Consumo de Energia Primária
COP	Coeficiente de Desempenho
COVs	Compostos Orgânicos Voláteis
DGEG	Direção Geral de Energia e Geologia
EER	Rácio de Eficiência Energética
EPBD	Diretiva do Desempenho Energético dos Edifícios
EPS	Poliestireno Expandido
ETICS	<i>External Thermal Insulation Composite Systems</i>
EU	União Europeia
GEEE	Gases com Efeito de Estufa
GN	Gás Natural
HAP	<i>Hourly Analysis Program</i>
ICB	Aglomerado de cortiça
MW	Lã Mineral
PIR	Poliisocianurato
PNEC	Plano Nacional Integrado de Energia e Clima
PORE	Ponto Ótimo de Rentabilidade Económica
PUR	Espuma de Poliuretano
QAI	Qualidade do Ar Interior
RNC	Roteiro para a Neutralidade Carbónica
SACE	Sistemas de Automatização e Controlo de Edifícios
SCE	Sistema de Certificação Energética dos Edifícios
SCOP	Coeficiente de Desempenho Sazonal
SEER	Rácio de Eficiência Energética Sazonal
TEP	Tonelada Equivalente de Petróleo
UNFCCC	Convenção-Quadro das Nações Unidas para Combate às Alterações Climáticas

URE	Utilização Racional de Energia
UTA	Unidade de Tratamento de Ar
UTAN	Unidade de Tratamento de Ar Novo
VE	Ventilador de Extração
XPS	Poliestireno Extrudido

Símbolos Químicos

CH ₄	Metano
CO ₂	Dióxido de Carbono
NO _x	Óxidos de Azoto

Índice

Agradecimentos	i
Declaração de integridade	iii
Resumo	v
Abstract	vii
Índice	xiii
Índice de Figuras	xv
Índice de Tabelas	xvii
1 Introdução	1
1.1 ENQUADRAMENTO	1
1.2 OBJETIVOS	6
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO	7
2 Estado da Arte	9
2.1 SISTEMA DE CERTIFICAÇÃO ENERGÉTICA DOS EDIFÍCIOS	9
2.2 VENTILAÇÃO E QUALIDADE DO AR INTERIOR.....	11
2.3 CLIMATIZAÇÃO	12
2.4 MEDIDAS PASSIVAS E ENVOLVENTE DOS EDIFÍCIOS	15
2.4.1 <i>Isolamento Térmico</i>	15
2.4.2 <i>Vãos Envidraçados</i>	25
2.5 MEDIDAS ATIVAS	30
2.6 SIMULAÇÃO DINÂMICA MULTIZONA	34
2.6.1 <i>EnergyPlus</i>	34
2.6.2 <i>Hourly Analysis Program</i>	35
3 Metodologia e Caracterização	37
3.1 CARACTERIZAÇÃO DO EDIFÍCIO.....	37
3.1.1 <i>Paredes Exteriores e Vãos Envidraçados</i>	38
3.1.2 <i>Portões e Cobertura</i>	40
3.1.3 <i>Pavimento e Iluminação</i>	42
3.2 CASO BASE E MEDIDAS DE MELHORIA	42
3.2.1 <i>Caso Base</i>	43
3.2.2 <i>Medida de Melhoria 1 - Isolamento da Cobertura</i>	43
3.2.3 <i>Medida de Melhoria 2 - Isolamento da Fachada Sul (ETICS)</i>	44

3.2.4	<i>Medida de Melhoria 3 - Melhoria dos Vãos Envidraçados e Portões de Acesso</i>	44
3.2.5	<i>Medida de Melhoria 4 - Adoção de Todas as Medidas Anteriores</i>	45
4	Resultados	47
4.1	CASO BASE	47
4.2	ISOLAMENTO DA COBERTURA	48
4.3	ISOLAMENTO DA FACHADA SUL (ETICS)	50
4.4	MELHORIA DOS VÃOS ENVIDRAÇADOS E PORTÕES DE ACESSO	51
4.5	ADOÇÃO DE TODAS AS MEDIDAS ANTERIORES	53
4.6	DIMENSIONAMENTO E ANÁLISE DO CONSUMO ENERGÉTICO	55
4.6.1	<i>Caudal Mínimo de Ar Novo</i>	57
4.6.2	<i>Dimensionamento da UTA para a Medida de melhoria 1 e 4</i>	61
4.6.3	<i>Aplicação das Medidas</i>	62
4.6.4	<i>Consumo Energético</i>	63
5	Conclusões e Desenvolvimentos Futuros	67
5.1	CONCLUSÕES	67
5.2	DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	70
	Referências	73
	Apêndices	79
	APÊNDICE A - CONSUMO MENSAL DO CHILLER E DA BOMBA DE CALOR	79
	APÊNDICE B - CONSTITUIÇÃO DAS PAREDES EXTERIORES	89
	APÊNDICE C – GANHOS TÉRMICOS EM FUNÇÃO DA ESPESSURA DE ISOLAMENTO DA COBERTURA	90
	Anexos	93
	ANEXO A – DIMENSIONAMENTO DA UTA PARA A 1ª E 4ª MEDIDA	93

Índice de Figuras

Figura 1.1 - Consumos de energia final primária e final no período de 2013-2022 [3]... 2	2
Figura 1.2 - Dependência energética entre o período de 2013-2022 [3]. 3	3
Figura 2.1 – Exemplo de um certificado Energético de uma habitação. 10	10
Figura 2.2 - Esquema de uma unidade de tratamento de ar utilizada num complexo industrial [21]. 14	14
Figura 2.3 - CEIT do EPS, XPS e MW. 17	17
Figura 2.4 - Constituição do sistema ETICS [29]..... 17	17
Figura 2.5 - Constituição de uma parede isolada pelo interior com câmara de ar [24]. 19	19
Figura 2.6 – Coberturas em Portugal em função do ano de construção [34]. 22	22
Figura 2.7 - Constituição de uma cobertura inclinada sem isolamento [24]. 22	22
Figura 2.8 - Alterações ao consumo energético de arrefecimento e aquecimento para uma refletividade solar de 0,65 [37]. 24	24
Figura 2.9 - Representação de um vão com vidro duplo, triplo e quádruplo [38]. 26	26
Figura 2.10 - CAE e consumo energético num apartamento, para vãos envidraçados de diferentes classes (adaptado de [39]). 27	27
Figura 2.11 - Reabilitação de vidro duplo com vidro de baixa emissividade pelo interior (adaptado de [44]). 30	30
Figura 2.12 - Bombas de calor vendidas em 2022 por país (adaptado de [47])..... 32	32
Figura 2.13 - Comparação de custos de configurações de BC com caldeira GN + sistema split (adaptado de [50]). 33	33
Figura 3.1 - Área útil da nave 1 do piso 1..... 38	38
Figura 3.2 - Fachada Sul. 39	39
Figura 3.3 - Portões de acesso. 40	40
Figura 3.4 - Cobertura do edifício..... 41	41
Figura 3.5 - Método de obtenção da inclinação da cobertura e a sua área total exposta a sul..... 41	41
Figura 3.6 - Cobertura da nave oficial. 42	42
Figura 4.1 - Variação do calor sensível total do espaço com a espessura de isolamento (ETICS)..... 50	50
Figura 4.2 – Concentração de CO ₂ em função do caudal de ar novo introduzido no espaço..... 60	60
Figura 4.3 - Configuração proposta (azul – Insuflação, castanho – extração, preto – extração localizada). 63	63
Figura 4.4 - Seleção do ventilador de insuflação [63]. 65	65

Índice de Tabelas

Tabela 2.1 - Condutibilidade térmica de materiais isolantes típicos (adaptado de [24]).	16
Tabela 2.2 - Resistências térmicas de isolantes mais comuns em Portugal e custos associados [30][24].	18
Tabela 2.3 - Comparação do coeficiente global de transmissão de calor para isolamento interior e exterior com EPS (adaptado de [24]).	20
Tabela 2.4 - Coeficiente global de transmissão de calor para uma cobertura inclinada isolada com 40 mm e 60 mm de EPS e não isolada [24].	23
Tabela 2.5 - Redução do consumo energético para arrefecimento em função da refletividade solar da cobertura (adaptado de [37]).	24
Tabela 2.6 - Coeficiente global de transmissão térmica de vidros duplos, de correr, em função do material da caixilharia (adaptado de [24]).	26
Tabela 2.7 - Caudais de infiltração em função da classe de permeabilidade (adaptado de [19]).	28
Tabela 2.8 - Permeabilidade do vão envidraçado com e sem a película (adaptado de [42]).	29
Tabela 3.1 – Dimensões principais da nave.	38
Tabela 3.2 - Caracterização das pontes térmicas da fachada sul.	39
Tabela 3.3 - Área total das paredes exteriores.	40
Tabela 3.4 - Temperatura exterior de projeto.	43
Tabela 3.5 - Constituição do sistema ETICS da fachada sul.	44
Tabela 4.1 - Ganhos/perdas térmicas pela envolvente.	47
Tabela 4.2 - Variação do calor sensível total face ao aumento da espessura de isolamento da cobertura.	48
Tabela 4.3 - Melhorias térmicas percentuais ao aplicar isolamento na cobertura.	49
Tabela 4.4 - Impacto da cobertura no calor sensível total em função da espessura de isolamento.	49
Tabela 4.5 - Desempenho térmico da fachada sul e o seu impacto no calor sensível total do espaço, em função da espessura de isolamento (ETICS).	50
Tabela 4.6 - Melhorias térmicas no grupo de paredes exteriores resultantes da melhoria da fachada sul, em função da espessura de isolamento (ETICS).	51
Tabela 4.7 - Características do vão envidraçado implementado.	52
Tabela 4.8 - Melhoria dos vãos envidraçados e portões de acesso.	52

Tabela 4.9 – Melhorias e impacto no calor sensível total do espaço (Medida de melhoria 3).....	53
Tabela 4.10 - Melhorias obtidas com a implementação da Medida de melhoria 4.....	53
Tabela 4.11 - Impacto da implementação de cada medida e potências de arrefecimento e aquecimento associadas.	53
Tabela 4.12 - Resumo do impacto no calor sensível total da 1ª, 2ª e 3ª medida.	54
Tabela 4.13 - Características do motor 18.310 HOCL-NL (adaptado de [57]).	57
Tabela 4.14 - Caudal mínimo de ar novo adotado.	59
Tabela 4.15 - Dimensionamento da unidade de tratamento de ar (Medida de melhoria 1).	61
Tabela 4.16 - Dimensionamento da unidade de tratamento de ar (Medida de melhoria 4).	61
Tabela 4.17 - Condições interiores atingidas no dia de projeto (Medida de melhoria 1 e 4).	62
Tabela 4.18 - Consumo energético anual em função do caudal de ar novo para a Medida de melhoria 4.	64
Tabela 4.19 – Potência de arrefecimento e aquecimento da UTA em função do caudal de ar novo.....	66

1 Introdução

1.1 Enquadramento

Dada a crescente relevância do consumo de energia verificado nos últimos anos, torna-se imperativo adotar estratégias eficazes para a sua redução e gestão do consumo de energia nos diversos setores de atividade. A dependência dos combustíveis fósseis e os desafios associados à segurança energética, às flutuações dos preços do petróleo e às alterações climáticas reforçam a necessidade de uma transição energética sustentável e eficiente.

A procura crescente por fontes de energia, associada à volatilidade dos mercados e às incertezas geopolíticas, tem impulsionado a adoção de políticas públicas e regulamentos que visam a diversificação da matriz energética e a descarbonização das economias. Neste contexto, a redução da intensidade energética e o aumento da eficiência energética surgem como vetores fundamentais para mitigar os impactos ambientais e económicos do consumo de energia. Em 2015, o Acordo de Paris estabeleceu como meta travar o aquecimento global apenas a 2 °C acima dos níveis pré-industriais e promover a descarbonização [1]. Como resposta a este compromisso, em 2016, a Comissão Europeia apresentou o pacote legislativo “Energia Limpa para todos os Europeus”, com o intuito de promover a transição energética na década 2021-2030. Como parte deste pacote, os Estados-Membros ficaram encarregues de apresentar à Comissão Europeia um Plano Nacional Integrado de Energia e Clima (PNEC) para o horizonte de 2030 [2].

O PNEC estabelece metas e objetivos para os estados-membros relativos à eficiência energética, emissões de gases com efeito de estufa (GEE), energias renováveis, segurança energética, inovação e competitividade e mercado interno e investigação,

tornando-se o principal instrumento de política energética e climática para a década de 2021-2030 [2].

Em Portugal, a monitorização da evolução do consumo energético é realizada anualmente pela Direção Geral de Energia e Geologia (DGEG), através do balanço energético nacional. Este balanço permite aferir a evolução dos consumos energéticos por setor de atividade, sendo assim possível tirar conclusões relativamente ao estado energético do país (Figura 1.1).

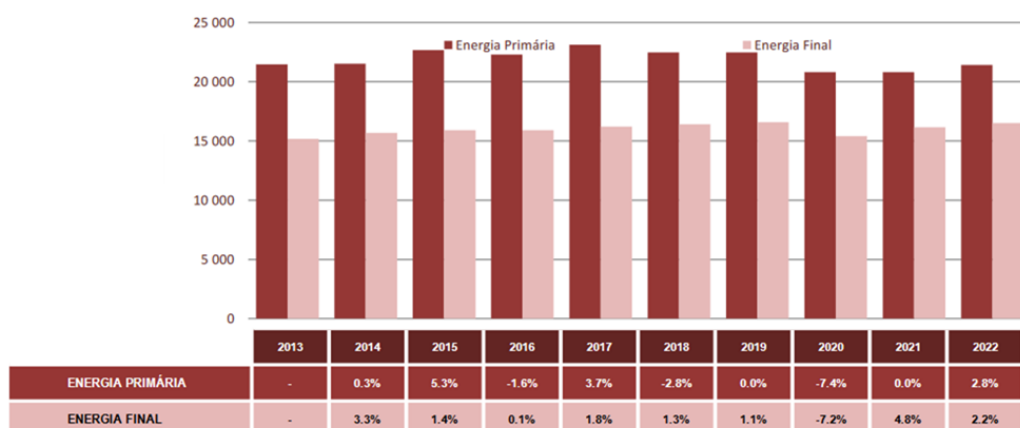


Figura 1.1 - Consumos de energia final primária e final no período de 2013-2022 [3].

O Balanço Energético Sintético de 2022, revela que o consumo de energia primária (CEP) registou um aumento de 2,8% face ao ano de 2021, impulsionado principalmente pelo incremento no consumo de petróleo e seus derivados, que registaram um aumento de 7,6%. Simultaneamente, o consumo de energia final (CEF) apresentou um crescimento de 2,2% em relação ao ano anterior, fruto do aumento do consumo nos setores dos serviços e transportes, com variações de 11% e 5%, respetivamente [3].

O PNEC estabelece que Portugal deve reduzir a sua dependência energética para 65% até 2030 [4]. Analisando os dados fornecidos pela DGEG, em 2020 a dependência energética atingiu o valor de 65,8 %. Este valor, historicamente baixo, resultou do impacto da pandemia de COVID-19, que levou a uma redução significativa do consumo de energia final, bem como a alterações nos comportamentos sociais da população [3]. Para comprovar esta afirmação, em 2022 a dependência energética atingiu os 71,2 %, tendo sido 4,1% superior ao valor observado em 2021.

A análise dos dados apresentados na Figura 1.2 demonstra que o valor médio da dependência energética entre 2013 e 2022 foi de 74,25 %. Os valores mais baixos de 67,7 % e 69,3 % foram registados no ano 2020 e 2021 respetivamente, podendo ser considerados *outliers* devido aos fatores excecionais relacionados com a pandemia.

Desta forma, o valor mais baixo de 72,3 % regista-se no ano de 2014, ainda distante da meta definida pelo PNEC que fixa este valor a 65% até 2030.

Dado o atual panorama energético, torna-se imperativo que parte da solução para a redução da dependência energética e consumo de energias fósseis passe pela implementação de medidas concretas e consciencialização que permitam racionalizar a energia final consumida a uma larga escala, sendo assim possível reduzir o saldo importador energético.

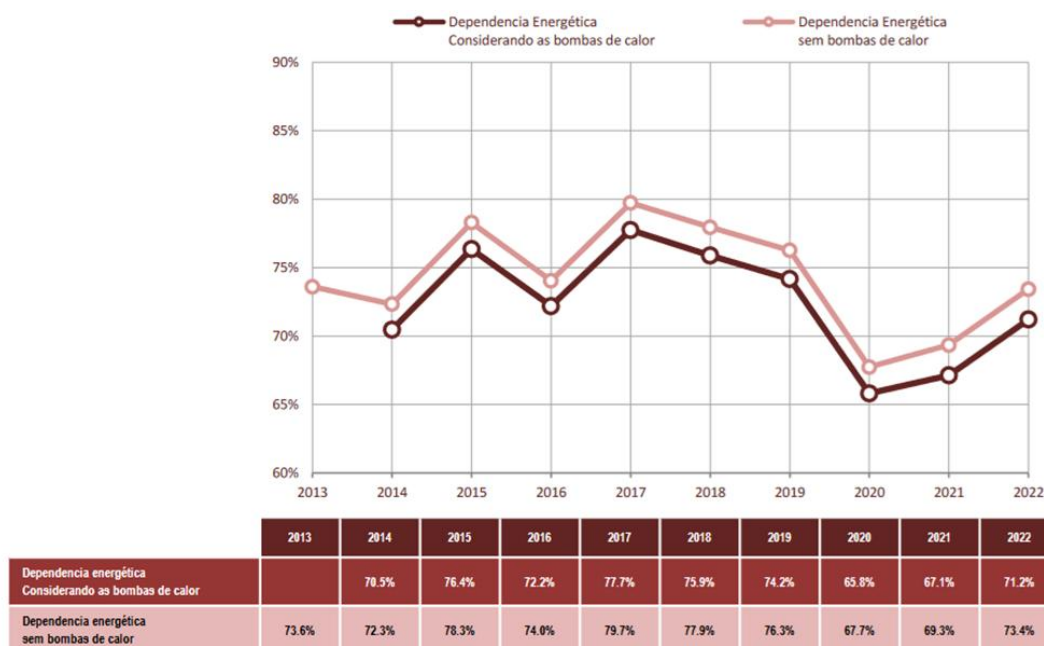


Figura 1.2 - Dependência energética entre o período de 2013-2022 [3].

Para garantir o acesso universal da população à energia, esta tem de ser previamente produzida e transformada, muitas vezes com recurso a queima de combustíveis fósseis, que resulta na emissão de gases com impacto ambiental significativo. Um exemplo destes gases é o dióxido de carbono (CO₂), que ao ser libertado para a atmosfera, retém a radiação solar e provoca o fenómeno conhecido como efeito de estufa, contribuindo para o aquecimento global. Outros gases que provocam o efeito de estufa são o óxido nitroso (N₂O), o metano (CH₄) bem como os compostos fluorados. Destes, as emissões de CO₂ e de N₂O são principalmente provenientes do setor energético, agrícola e dos transportes [5].

As alterações climáticas ganharam relevância global nas últimas décadas do século XX. A primeira Conferência das Nações Unidas sobre o Clima, realizada em 1979, marcou o início de uma série de iniciativas para o combate às alterações climáticas [6]. Uma delas foi a Convenção-Quadro das Nações Unidas para Combate às Alterações Climáticas (UNFCCC), cujo objetivo principal é o de evitar a interferência humana no

sistema climático, estabilizando a concentração de GEE, tendo entrado em vigor a 21 de março de 1994 [7].

O Protocolo de Quioto, assinado em 1997, estabeleceu metas a um nível internacional, para redução das emissões de GEE. Este protocolo considera que os países mais desenvolvidos, denominados países do anexo I, são aqueles que devem estar sujeitos a metas mais audazes e em teoria, mais difíceis de atingir. Este reconhecimento surge devido ao facto de serem estes os países que até à data, teriam contribuído mais para o aumento da concentração de GEE, dado que se industrializaram muito mais cedo que os países não contemplados neste anexo [7].

Atualmente, no seguimento do Acordo de Paris, o pacote legislativo “Energia Limpa para todos os Europeus” encarrega os estados-membros participantes a estabelecer as metas e estratégias definidas para o ano de 2030 através do PNEC. As alterações climáticas continuam a apresentar-se como o agente principal na ameaça climática. Esta ameaça traz consequências sociais e económicas, existindo assim o interesse de cada estado-membro em atuar e prevenir a emissão de gases com efeito de estufa da melhor forma possível.

No panorama atual da descarbonização nacional, o Roteiro para a Neutralidade Carbónica (RNC50) tem como objetivo reduzir as emissões de GEE por forma a que se atinga um balanço entre a taxa de produção destes gases e a sua respetiva taxa de remoção por parte das plantas, solo e oceano até 2050 [8]. Trata-se de um processo a longo prazo, cujas áreas de intervenção incluem os transportes, resíduos, energia, edifícios, agricultura, florestas e uso do solo.

O conceito de eficiência energética visa utilizar o mínimo possível de energia, mantendo o nível de produção de bens, serviços e de conforto através de tecnologias que reduzem os consumos face a soluções convencionais. Esta ideia denominada de Utilização Racional de Energia (URE) é um pilar fundamental na implementação de medidas promotoras de eficiência energética, que permite diminuir o consumo de energia e as emissões poluentes associadas à sua conversão.

O setor dos edifícios representa 40% do consumo de energia final na Europa e 30% em Portugal, verificando-se que este consumo poderia ser reduzido em mais de 50% através da adoção de medidas que promovem a eficiência energética, tendo como consequência a redução anual de 400 milhões de toneladas de CO₂ [9].

Cerca de 75% do edificado português não consegue manter as temperaturas de conforto térmico estabelecidas pela Organização Mundial de Saúde. Esta organização define os intervalos de temperatura ideais entre os 18 °C e 21 °C, no inverno, e entre 19 °C e 23

°C, no verão. Tal realidade evidencia que a maioria dos edifícios em Portugal carece de um isolamento térmico adequado, havendo a necessidade de recorrer a equipamentos de aquecimento e arrefecimento, contribuindo significativamente para o aumento do consumo de energia final [10]. Torna-se, portanto, importante implementar medidas que promovam a eficiência energética tendo o conforto térmico em mente, quer nas habitações, quer nos edifícios de comércio e serviços.

A redução do consumo energético e promoção do conforto térmico pode ser realizada de duas formas distintas, através de medidas passivas, que atuam sobretudo na envolvente dos edifícios, e medidas ativas, relacionadas com a produção de energia local através de fontes renováveis, bem como a implementação de equipamentos energeticamente eficientes.

As medidas passivas estão fortemente associadas ao tipo de solução construtiva adotada nas coberturas, paredes exteriores, pavimentos e vãos envidraçados. O objetivo, de qualquer um destes constituintes da envolvente do edifício é minimizar as trocas de energia com o ambiente exterior, permitindo manter a temperatura de conforto do espaço e reduzindo a utilização dos sistemas de aquecimento e arrefecimento, contribuindo assim para a redução do consumo energético sem atuar nos equipamentos responsáveis pela climatização. Além dos materiais isolantes, existem tecnologias complementares capazes de aumentar a eficiência energética da envolvente, como por exemplo a adoção de tintas refletoras nas coberturas, sistemas de isolamento interior e exterior para as paredes exteriores, bem como a utilização de vãos envidraçados com múltiplas camadas de vidro, caixa de ar, caixilharias termicamente eficientes, bem como sistemas de sombreamento passivo e ativo.

A eficiência energética dos edifícios também pode ser promovida através da adoção de tecnologias mais avançadas, que permitem reduzir o custo do ciclo de vida destes equipamentos. Apesar do seu custo inicial mais elevado, por serem mais eficientes, o reduzido custo de vida destes permite amortizar o investimento inicial. Este conceito proporciona uma série de vantagens, nomeadamente [11]:

- Reforço da competitividade das empresas;
- Redução da fatura energética nacional;
- Diminuição da intensidade energética da economia;
- Redução da dependência energética externa;
- Menor emissão de poluentes, incluindo os GEE;

Apesar dos benefícios aparentes que a URE possui, a implementação destas tecnologias é afetada por alguns fatores.

Por um lado, as tecnologias mais eficientes estão associadas a um investimento inicial maior, apesar dos custos ao longo da vida dos equipamentos serem reduzidos devido à redução dos seus consumos de funcionamento. Muitas vezes, o retorno de investimento é relativamente longo, podendo atingir valores superiores a 3 anos que, aliado à escassez de capital para realizar estes investimentos e à limitação no acesso a crédito, torna a adoção destas tecnologias difícil.

Para mitigar estes desafios, várias medidas têm sido implementadas para promover a URE. Programas elaborados por empresas distribuidoras e entidades governamentais incluem [11]:

- Programas de formação e divulgação técnica;
- Auditorias e ações de diagnóstico;
- Programas de demonstração de novas tecnologias;
- Incentivos financeiros a fundo perdido;
- Linhas de crédito sem juros ou com taxas reduzidas;

Grande parte dos estudos e medidas implementadas em Portugal sobre eficiência energética no setor da construção tem sido direcionada para edifícios de habitação e serviços, com menor foco no edificado industrial [12] [12] [13]. No entanto, os edifícios industriais apresentam desafios específicos, devido à natureza dos seus processos produtivos, às suas necessidades térmicas e à grande variabilidade das cargas internas. Assim, a aplicação de soluções de eficiência energética deve ser analisada de forma diferenciada, considerando não apenas a envolvente térmica, mas também os sistemas industriais e os processos produtivos.

1.2 Objetivos

A presente dissertação tem como objetivo principal propor soluções de melhoria ao nível da qualidade do ar interior (QAI) e do desempenho térmico de uma nave oficial da CARRIS.

Para este efeito, pretende-se desenvolver um estudo detalhado sobre o comportamento térmico da envolvente do edifício e as condições de ventilação, de modo a garantir um

ambiente interior energeticamente eficiente e em conformidade com os requisitos de conforto térmico e qualidade do ar interior definidos pela regulamentação em vigor.

De modo a realizar a avaliação do desempenho térmico pretende-se quantificar o impacto de cada elemento da envolvente (cobertura, paredes, pavimentos e vãos envidraçados) nas trocas térmicas entre o espaço interior e o ambiente exterior. Após essa quantificação serão identificados os principais pontos de ineficiência térmica da nave oficial que deverão ser sujeitos a melhorias. Com base nos resultados obtidos serão propostas soluções de melhoria baseadas em materiais e técnicas de isolamento térmico, com análise do seu impacto na redução das cargas térmicas. Adicionalmente, será efetuada uma análise numérica onde se pretende verificar a influência que as diferentes espessuras de isolamento têm no comportamento térmico do edifício.

No âmbito da melhoria da QAI, o objetivo é determinar o caudal de ar novo mínimo necessário à diluição das cargas poluentes geradas pelos ocupantes e pelo próprio edifício, utilizando os métodos descritos na legislação em vigor. Além disso, pretende-se avaliar a conformidade da ventilação com a legislação e normas vigentes, bem como propor uma disposição otimizada para os pontos de insuflação, extração e extração localizada, garantindo uma renovação de ar eficiente e homogénea no espaço.

Posteriormente, para as medidas de melhoria que apresentarem o maior impacto no desempenho energético e térmico, serão dimensionados os sistemas de aquecimento, ventilação e ar condicionado (AVAC) com base no caudal de ar novo previamente determinado.

Finalmente, será avaliado o consumo energético da nave oficial em função das soluções propostas e do caudal de ar novo insuflado, bem como se pretende comparar diferentes cenários de melhoria, considerando o potencial de redução do consumo energético das soluções.

1.3 Estrutura do Trabalho

O presente trabalho encontra-se dividido em cinco capítulos, sendo que estes se dividem numa revisão de literatura e na análise e obtenção de dados e resultados.

O primeiro capítulo aborda o panorama energético mundial e o seu estado atual num contexto nacional, mencionando temas como a dependência energética em Portugal, a utilização racional de energia, programas e metas definidos neste âmbito, as energias renováveis como ferramenta de combate à dependência energética, a pobreza energética existente nos edifícios habitacionais e industriais, entre outros.

O segundo capítulo corresponde à revisão de literatura, começando por incidir sobre o Sistema de Certificação Energética dos Edifícios, o seu historial e âmbito de aplicação. Posteriormente é abordado o tema da ventilação e da Qualidade do Ar Interior, a sua importância, exemplos de aplicação e legislação associada. De seguida é feita referência ao tema da climatização, em que consiste, como pode ser feita, tecnologia existente e o seu contexto de aplicação, bem como exemplos de instalações encontradas em indústrias. São também abordados os temas das medidas passivas e ativas, dando especial atenção ao papel do isolamento térmico e das bombas de calor nos dias de hoje. O último ponto desta revisão aborda o tema dos programas de simulação dinâmica multizona, em que consistem, alguns programas existentes no mercado, bem como as suas vantagens e desvantagens.

O terceiro capítulo descreve o edifício que será alvo deste estudo, caracterizando a sua envolvente e apresentando as propostas de melhoria.

No quarto capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos através do programa HAP, da Carrier, das melhorias apresentadas anteriormente. Além disto, neste capítulo será abordado o tema do caudal mínimo de ar novo, aplicação das medidas propostas, bem como uma análise ao consumo energético da instalação.

Por último, no quinto capítulo são apresentadas as conclusões deste trabalho e sugeridas recomendações para trabalhos futuros.

2 Estado da Arte

Ao longo do desenvolvimento deste documento, verificou-se que existe pouca literatura que estivesse diretamente relacionada com ambientes industriais. Deste modo, foram analisados contextos e situações cujos resultados podem ser extrapolados e aplicados a um ambiente industrial por haver semelhanças entre ambos, mesmo que não incidindo necessariamente sobre estes.

2.1 Sistema de Certificação Energética dos Edifícios

O Sistema de Certificação Energética dos Edifícios (SCE) foi implementado a 1 de julho de 2007 após a primeira transposição da Diretiva do Desempenho Energético dos Edifícios (EPBD) em 2006 [14]. Este sistema, gerido pela Agência para a Energia (ADENE), tem desempenhado um papel fundamental na melhoria das condições de salubridade, conforto térmico e combate à pobreza energética do seu parque edificado, contribuindo assim para o cumprimento, ainda que parcial, das diversas metas estabelecidas pelo PNEC [15]. Neste âmbito, surge o Certificado Energético (CE), documento emitido por peritos qualificados, que classifica o desempenho energético dos edifícios numa escala de A+ (mais eficiente) a F (menos eficiente), tal como apresentado na Figura 2.1. Esta certificação fornece uma avaliação quantitativa do consumo energético do imóvel e recomenda medidas de melhoria para aumentar a sua eficiência.

Ao longo das suas diversas versões, o SCE tem vindo a considerar como objeto de CE cada vez mais tipos de edifícios. Na sua atual redação, o sistema distingue entre edifícios de habitação e edifícios de comércio e serviços. Estes podem ainda ser classificados de acordo com a sua fase do ciclo de vida em [14]:

- Edifício novo;
- Edifício sujeito a renovação;

- Edifício sujeito a grande renovação;
- Edifício existente, abrangido pelo Decreto-Lei n.º 118/2013, de 20 de agosto;
- Edifício existente, abrangido pelos Decretos-Lei n.º 79/2006 ou n.º 80/2006, de 4 de abril;
- Edifício existente, anterior aos Decretos-Lei n.º 79/2006 ou n.º 80/2006, de 4 de abril;



Figura 2.1 – Exemplo de um certificado Energético de uma habitação.

No que concerne aos edifícios industriais e às oficinas, a obrigatoriedade da certificação energética depende do perfil de consumo energético do espaço. De acordo com a legislação vigente, os edifícios que não possuem, nem preveem a instalação de sistemas de climatização destinados ao conforto térmico humano, estão isentos das exigências do SCE [16]. No entanto, em casos onde existam sistemas de aquecimento, ventilação e ar condicionado (AVAC) destinados ao bem-estar dos ocupantes, a certificação passa a ser obrigatória, mesmo em edifícios com funções predominantemente industriais.

2.2 Ventilação e Qualidade do Ar Interior

A ventilação desempenhada por um ou mais sistemas de AVAC possui um papel fundamental na manutenção da qualidade do ar interior (QAI). O seu principal objetivo é assegurar a introdução da quantidade necessária de ar novo num espaço, de forma a assegurar condições adequadas de QAI, permitindo controlar parâmetros essenciais do ar, como a pureza, renovação e o seu movimento. A sua importância tornou-se ainda mais evidente com a pandemia da Covid-19, período em que a introdução de ar novo proveniente do exterior, bem como o processo de filtragem do ar insuflado nos Espaços, revelou-se crucial não só para a diluição da concentração de poluentes, mas também para reduzir a possível concentração do vírus em ambientes fechados.

O tipo de sistema de ventilação a implementar depende diretamente da natureza das atividades desempenhadas num determinado local. Para as habitações, em geral, é suficiente recorrer a uma ventilação natural para garantir a renovação do ar. No entanto, em algumas indústrias, onde há uma maior geração de poluentes e diferentes exigências térmicas e de qualidade do ar, torna-se necessária a utilização de sistemas de ventilação mecânica controlada, capazes de assegurar taxas adequadas de renovação do ar e remoção de contaminantes.

Os poluentes físico-químicos no ar interior que são alvo de monitorização e controlo são as partículas em suspensão (frações PM10 e PM2,5), compostos orgânicos voláteis totais (COVs), monóxido de carbono (CO), formaldeído (HCHO) e dióxido de carbono (CO₂), bem como os hidrocarbonetos, mais comuns em espaços oficiais. A concentração desses poluentes varia consoante o tipo de ocupação e atividade desenvolvida no espaço. Espaços como naves oficiais, terão naturalmente concentrações de CO₂ superiores às de uma habitação, fruto da existência de aparelhos de combustão no interior do local e, portanto, exigem sistemas de ventilação mais robustos para garantir a diluição eficaz da sua concentração. A existência de poluentes microbiológicos como as bactérias e fungos também são alvo de controlo, sendo causados principalmente devido à humidade no espaço.

Neste sentido, nos termos do n.º 8 do artigo 16.º do Decreto-Lei n.º 101-D/2020, de 7 de dezembro, as disposições sobre a QAI são regulamentadas pela Portaria n.º 138-G/2021, de 1 de julho, que estabelece os requisitos para a avaliação da QAI nos edifícios de comércio e serviços. Este diploma especifica os limiares de proteção para diferentes poluentes, as condições de referência e os critérios de conformidade, a respetiva metodologia para a medição dos poluentes e a fiscalização do cumprimento das normas estabelecidas [17].

Com o objetivo de estabelecer os valores mínimos de caudal de ar novo considerados suficientes para a remoção de poluentes de um determinado espaço, o manual do SCE estabelece a metodologia de cálculo para os diferentes critérios existentes, nos termos do n.º 4 do artigo 4.º do Decreto-Lei n.º 101 -D/2020, de 7 de dezembro, sendo estes o critério de ocupação, constituído pelo método prescritivo e o método analítico, e o critério do edifício. Destes, o valor a selecionar será o maior que resulta dos dois critérios, embora a utilização do método prescritivo ou analítico fique ao critério do projetista. No entanto, algumas áreas específicas são excluídas da exigência de cumprimento de valores de caudal mínimo de ar novo, ou da verificação de condições de ventilação natural. Para efeitos de introdução de ar no espaço as áreas incluem [18]:

- Corredores, balneários, instalações sanitárias, arrumos, armazéns, copas e espaços similares;
- Espaços técnicos e locais sujeitos a requisitos específicos de higiene e segurança no local de trabalho no âmbito da respetiva atividade, com fontes poluentes específicas e nos quais são manuseados produtos químicos ou biológicos;

Além disso, o caudal de ar novo devido às infiltrações num edifício deve ser realizado para efeitos de verificação do cumprimento dos valores mínimos de caudal de ar novo recorrendo à ventilação natural.

O manual SCE estabelece três métodos distintos que podem ser utilizados em edifícios de comércio e serviços, sendo estes: o método base e o simplificado, para casos em que o sistema de ventilação é natural ou misto e; o método condicional, utilizado para sistemas de ventilação exclusivamente natural. Destes, o método simplificado e o condicional não podem ser aplicados a espaços onde se desenvolvam atividades passíveis de emissão de poluentes específicos e que possuam aparelhos de combustão, sendo o método base utilizado neste caso, assente em métodos de cálculo que satisfaçam os requisitos da norma EN 16798-7 ou outra tecnicamente equivalente [19].

2.3 Climatização

A climatização consiste no processo de tratamento do ar com o objetivo de modificar de forma individual ou conjunta, os seus parâmetros termohigrométricos, nomeadamente temperatura e humidade. Enquanto a ventilação se encarrega principalmente da renovação do ar interior e do controlo da concentração de partículas em suspensão, a climatização tem como finalidade garantir condições ambientais adequadas ao conforto

térmico e à QAI, promovendo a insuflação de ar tratado em conformidade com os requisitos do espaço.

Além das cargas internas geradas dentro de um dado espaço e os ganhos através da envolvente, os equipamentos de climatização devem ser capazes de tratar o ar proveniente do exterior, para efeitos de QAI, aumentando ou reduzindo a sua temperatura, bem como a humidade em alguns casos. O tratamento térmico e higrométrico do ar novo pode representar, em alguns casos, a maior parte do consumo da potência térmica disponível nos equipamentos de climatização.

A escolha da solução de climatização mais adequada depende de diversos fatores, incluindo a tipologia do edifício, a sua ocupação e os requisitos específicos de conforto e eficiência energética.

Em aplicações residenciais, os sistemas de expansão direta, os sistemas Split ou Multi Split são frequentemente utilizados. Estes sistemas operam em ciclo de compressão de vapor e permitem a recirculação do ar ambiente, alterando a sua temperatura e, em alguns casos, a sua humidade. Para edifícios de maior dimensão, como escritórios e espaços comerciais, os sistemas de volume de refrigerante variável (VRF) são os mais amplamente utilizados. Estes permitem a climatização simultânea de múltiplas zonas, proporcionando aquecimento e arrefecimento conforme necessário, especialmente em configuração de três tubos, que possibilitam a recuperação de calor entre diferentes zonas do edifício. A escolha deste tipo de solução é particularmente vantajosa em edifícios com fachadas orientadas de forma diferenciada, onde coexistem áreas com necessidades térmicas distintas.

Para soluções mais completas, as Unidades de Tratamento de Ar (UTA) são as mais recomendadas, pois permitem conjugar aspetos da ventilação com a climatização. A modularidade das UTA permite a sua adaptação às necessidades específicas do espaço a climatizar, promovendo um maior grau de flexibilidade e eficiência operacional. Permitem também adotar uma quantidade vasta de modos de funcionamento, regulação do caudal de ar novo e de retorno, bem como o controlo da temperatura e da humidade do ar. Além disso, possibilitam a incorporação de diferentes estágios de filtragem, através de um ou mais estágios de filtros, garantindo a remoção de partículas e contaminantes, o que contribui significativamente para a melhoria da QAI.

Nos edifícios industriais, para além das necessidades de aquecimento e arrefecimento dos espaços, é frequente a exigência de produção de água quente para diversos fins, tais como abastecimento de água quente sanitária (AQS), processos industriais e climatização através de sistemas como ventiloconvetores. Para este efeito, é

extremamente importante uma escolha correta dos equipamentos a implementar, tendo sempre em mente o impacto que os seus modos de funcionamento têm na eficiência energética dos mesmos. A título de exemplo, numa indústria de biotecnologia na Califórnia, a escolha da central de produção térmica recaiu sobre dois chillers de 1400 toneladas e um de 600 toneladas, ao invés de três de igual capacidade. Isto deve-se ao facto de assim, ser possível manter os chillers a funcionar em carga total, ponto no qual estes possuem uma eficiência máxima [20].

Devido à natureza das atividades desenvolvidas em muitos ambientes industriais, a renovação do ar interior é um requisito essencial para assegurar uma QAI dentro dos limites regulamentares. Devido a isto, as UTA são geralmente o equipamento mais utilizado, pois permitem controlar o caudal de ar novo, bem como utilizar a energia contida no ar interior para recuperação, aumentando a eficiência do equipamento. Num complexo industrial com laboratórios, por exemplo, a implementação de um sistema de tratamento de ar adequado permitiu garantir condições ambientais estáveis e controladas, conforme ilustrado na Figura 2.2 retirada do respetivo Sistema de Automação e Controlo de Edifícios (SACE) [21].

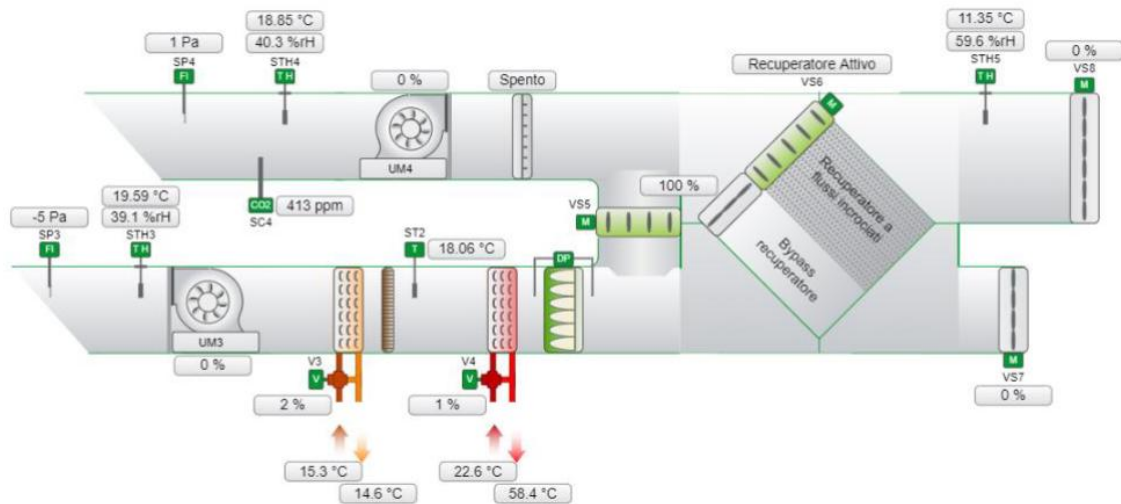


Figura 2.2 - Esquema de uma unidade de tratamento de ar utilizada num complexo industrial [21].

Uma vez que, tal como a maioria dos complexos industriais, este apresenta uma área técnica disponível considerável, foi também possível instalar uma bomba de calor geotérmica água-água com um Coeficiente de Desempenho (COP) de 4,8 e Rácio de Eficiência Energética (EER) de 6,2 aliada a um depósito de inércia com 450 m³ [21].

2.4 Medidas Passivas e Envolvente dos Edifícios

A envolvente dos edifícios desempenha um papel fundamental na separação entre o ambiente exterior, circundante ao edifício, e o ambiente interior, cujas condições de temperatura, humidade e QAI devem ser controladas. Este controlo pode ser necessário tanto para garantir o conforto térmico dos ocupantes quanto para responder a necessidades associadas ao tipo de atividade a executar no espaço ou uma combinação dos ambos.

As soluções construtivas adotadas para estas superfícies são responsáveis por grande parte do consumo energético do edifício, tendo estas o objetivo de minimizar a transferência de calor que ocorre do ambiente exterior para o interior (verão) ou do interior para o exterior (inverno), bem como reduzir a degradação do edifício devido a condensações resultantes de um isolamento pobre.

Desta forma, é extremamente importante adotar soluções construtivas compostas por materiais que promovam a eficiência energética do edifício. Entre as propriedades térmicas mais relevantes dos materiais utilizados na construção, destacam-se a: condutibilidade térmica do material (λ), a resistência térmica (R), e a sua inércia térmica (I_t),

A inércia térmica representa a capacidade do material em resistir às alterações da sua temperatura. A variação da temperatura de um dado material é afetada por variações na temperatura do meio a que este está exposto, um material com uma inércia térmica elevada resiste mais eficazmente a picos climáticos que surgem ao longo do dia, alterando a sua temperatura de uma forma mais lenta, permitindo reduzir o tempo de funcionamento de equipamentos de climatização, aumentando a sua eficiência energética e reduzindo o consumo de energia.

Já a resistência térmica pode ser definida como a capacidade que o material tem em resistir ao fluxo de calor que o atravessa. Um valor elevado deste parâmetro, leva a que a temperatura exterior provoque um aumento de temperatura na superfície interior da parede reduzido, contribuindo para a atenuação de ganhos térmicos no espaço e permitindo assim economizar a energia que seria despendida em equipamentos para aquecer ou arrefecer o ar ambiente.

2.4.1 Isolamento Térmico

O desempenho térmico da envolvente não depende apenas da escolha dos materiais isolantes, mas também da técnica de isolamento adotada. A escolha da técnica de

isolamento vai permitir, consoante o clima na zona de implementação e o grau de isolamento que se pretende obter, contribuir para a manutenção da temperatura interior e reduzir a degradação dos materiais, proporcionando um maior conforto aos ocupantes no espaço.

As técnicas de isolamento podem ser aplicadas pelo interior, pelo exterior ou em caixa de ar [22]. Os materiais de isolamento térmico são, em geral, de baixa densidade e altamente porosos, características que lhes conferem reduzida condutibilidade térmica. Entre os materiais mais utilizados destacam-se: Poliestireno Expandido (EPS) o Poliestireno Extrudido (XPS), a Espuma de Poliuretano (PUR), o Aglomerado de cortiça (ICB), lã mineral (MW) e as placas de Poliisocianurato (PIR), semelhantes à PUR. Destes, aqueles que marcam uma presença maior nos edifícios portugueses são o EPS, XPS e o ICB, sendo que nos últimos anos têm-se verificado um aumento na utilização do PIR. As condutibilidades térmicas médias dos referidos isolamentos podem ser observadas na Tabela 2.1 [24] [23].

Tabela 2.1 - Condutibilidade térmica de materiais isolantes típicos (adaptado de [24]).

Elemento de Camada	λ [W/m.K]
EPS	0,044
XPS	0,037
PUR/PIR (em placas)	0,040
ICB	0,045
MW (lã de rocha)	0,040

A escolha do isolamento térmico ideal tem sido amplamente discutida na literatura, sendo frequentemente analisada com base no conceito de Custo de Eficiência de Isolamento Térmico (CEIT). Este parâmetro traduz a relação entre a poupança energética obtida face ao custo do isolamento, correspondendo ao investimento monetário necessário para reduzir as perdas térmicas pela envolvente em 1 W/K de diferença entre a temperatura interior e exterior [25]. Entre os diversos materiais isolantes estudados, verifica-se que, do ponto de vista técnico-económico, o EPS é o que apresenta o valor de CEIT mais promissor, uma conclusão sustentada por vários estudos e ilustrada na Figura 2.3 [26][25]. Adicionalmente, quando comparado com a MW, o EPS apresenta um período de retorno do investimento inferior [27].

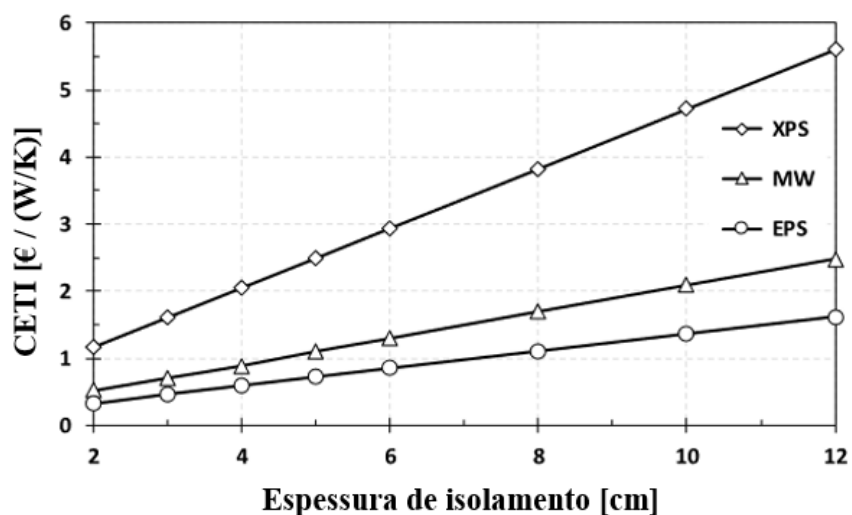


Figura 2.3 - CEIT do EPS, XPS e MW.

Apesar de possuir um custo inicial superior, o isolamento térmico pelo exterior revela-se a solução mais vantajosa, pois permite eliminar quase por completo as pontes térmicas, melhorando o desempenho térmico do edifício, aumentando o conforto térmico e a conservação do mesmo prevenindo condensações nas superfícies interiores frias resultantes das pontes térmicas [22]. Uma das técnicas mais utilizadas para isolamento pelo exterior muito utilizada é o ETICS (External Thermal Insulation Composite Systems), que consiste na aplicação de uma camada de isolante aplicada na face externa da parede que é fixada por colagem, mecanicamente ou uma combinação dos dois. Em Portugal, o EPS é utilizado como material isolante, com espessuras entre os 40 a 60 mm. No entanto, outros materiais como o XPS, ICB, PIR e a lã mineral como isolamento [28]. A Figura 2.4 ilustra as camadas constituintes do sistema ETICS.

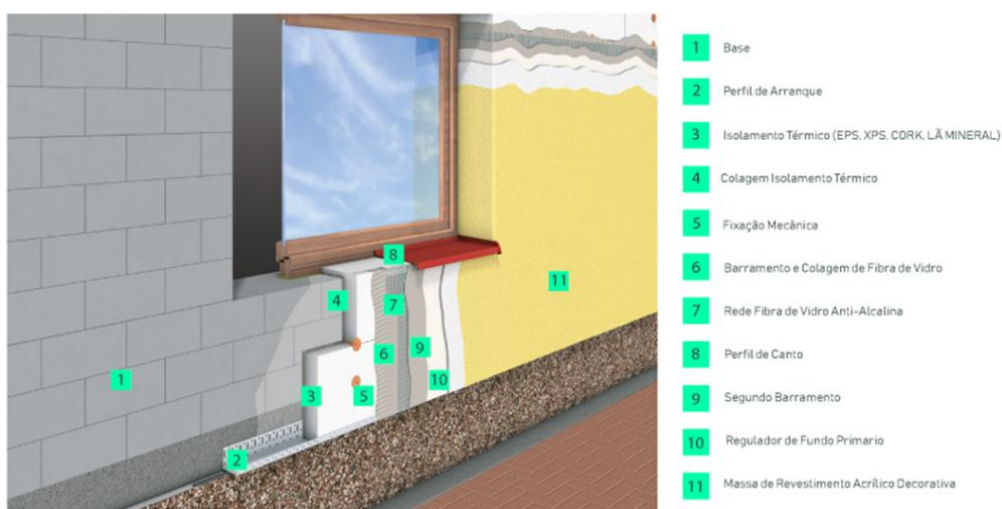


Figura 2.4 - Constituição do sistema ETICS [29].

Utilizando o EPS como isolante, com uma massa volúmica entre 15 e 20 kg/m³ e uma condutibilidade térmica de 0,040 W/(m.K), para uma espessura típica de 40 mm obtém-se um valor para o coeficiente global de transmissão de calor (U) de 0,58 W/(m².K), considerando um pano de alvenaria em tijolo furado com espessuras compreendidas entre 20 e 24 cm [24]. O custo médio do EPS varia entre 2,60 €/m² e 10 €/m² [23]. Aumentando a espessura de EPS para 60 mm o coeficiente global de transmissão de calor baixa para 0,45 W/(m.K), traduzindo uma redução de 22,5% face ao caso anterior. Por outro lado, a lã mineral como isolante, com uma massa volúmica entre 100 e 180 kg/m³, condutibilidade térmica de 0,042 W/(m.K) para a mesma espessura de isolante e de pano de alvenaria, obtém-se um U de 0,59 W/(m².K) [24]. A lã mineral apresenta um custo médio de 1,65 a 12 €/m² [30]. A Tabela 2.2 apresenta as resistências térmicas médias dos materiais isolantes mais comuns para espessuras de 40 mm e 60 mm, juntamente com os respetivos custos.

Tabela 2.2 - Resistências térmicas de isolantes mais comuns em Portugal e custos associados [30][24].

e_{Isolante} [m]	λ [W/m.K]	R [m ² .K/W]	Custo [€/m ²]
EPS [0,04]	0,044	0,913	2,60 a 10
MW [0,04]	0,042	0,945	1,65 a 12
ICB [0,04]	0,045	0,889	10 a 20
XPS [0,04]	0,037	1,081	2,60 a 10
PUR/PIR [0,04]	0,040	1,008	10 a 16
EPS [0,06]	0,044	1,370	2,60 a 10
MW [0,06]	0,042	1,417	1,65 a 12
ICB [0,06]	0,045	1,333	10 a 20
XPS [0,06]	0,037	1,622	2,60 a 10
PUR/PIR [0,06]	0,040	1,513	10 a 16

Com base em fatores técnico-económicos o EPS foi escolhido como isolamento térmico de um sistema ETICS para as paredes exteriores de uma habitação multifamiliar, enquanto o XPS foi utilizado para a cobertura [31]. Os resultados deste estudo demonstram que a seleção do tipo e material de isolamento é semelhante quer sejam utilizados critérios económicos e puramente energéticos, reforçando a relação positiva custo-benefício que este material e sistema de isolamento apresentam.

No entanto, há que atender à especificidade de cada espaço o que pode por vezes impossibilitar a implementação de alguns materiais dadas as suas características como a resistência ao fogo, isolamento acústico, resistência mecânica, permeabilidade ao vapor, libertação de partículas, entre outros. Além disso, verificou-se que o aumento da

espessura do material isolante tem um impacto superior em elementos da envolvente opaca cujos restantes constituintes possuam uma condutibilidade térmica alta.

O isolamento térmico pelo interior apresenta-se como uma solução que não é tão eficaz como pelo exterior, eliminando apenas pontes térmicas em pilares, permitindo que estas continuem a existir em vigas e lajes [22]. Visto que é aplicado sobre a parede interior, a redução de área útil no espaço é um fator a considerar ao utilizar esta técnica, bem como o desaproveitamento da inércia térmica das paredes. Por esse motivo, esta solução é frequentemente utilizada no caso de ações seletivas, quando por algum motivo se pretende isolar apenas uma parede que envolve o espaço e não existe outra alternativa [22]. Para um isolamento interior em EPS com massa volúmica de 15 a 20 kg/m^3 e condutibilidade térmica de 0,040 $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, a aplicação de uma espessura típica de 40 mm obtém-se um valor para o U de 0,58 $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ [24], considerando um pano de alvenaria em tijolo furado com caixa de ar, tal como apresentado na Figura 2.5.

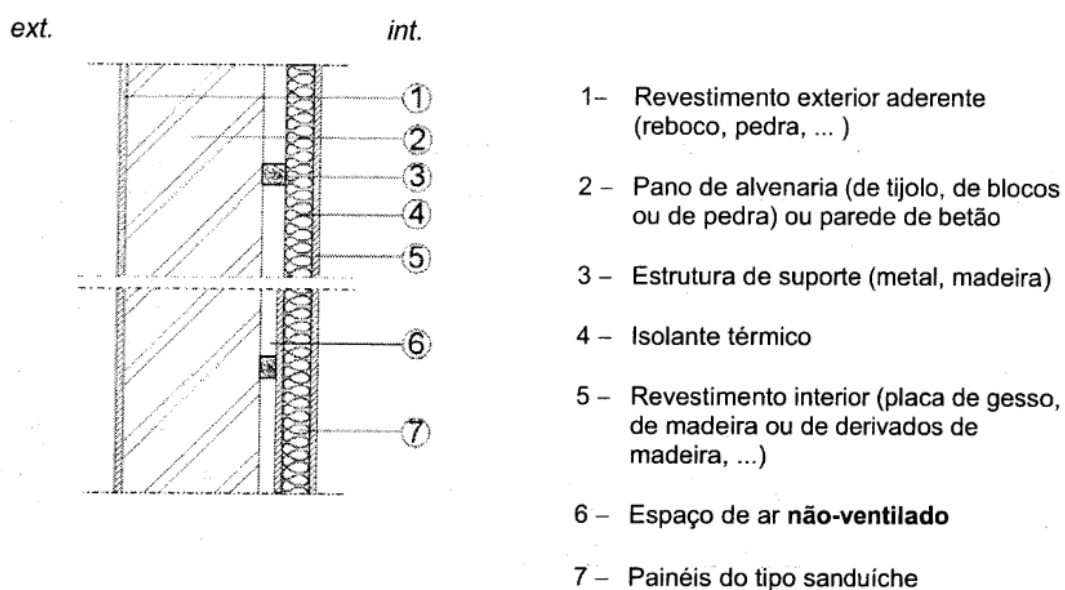


Figura 2.5 - Constituição de uma parede isolada pelo interior com câmara de ar [24].

O impacto do isolamento interior e exterior para uma parede simples isolada com 40 mm de EPS, com um pano de alvenaria em tijolo furado pode ser observada na Tabela 2.3.

Quando as paredes exteriores possuem caixa de ar, estas podem ser preenchidas com material isolante, sendo uma técnica comum em Portugal, que apresenta custos razoáveis e um grau de isolamento eficaz [32].

Tabela 2.3 - Comparação do coeficiente global de transmissão de calor para isolamento interior e exterior com EPS (adaptado de [24]).

Elemento Isolante	λ [W/m.K]	e [m]	R [m ² .K/W]	U [W/m ² .K]
EPS (interior)	0,040	0,040	1,000	0,51
EPS (exterior)	0,040	0,040	1,000	0,61

A espessura ótima de isolamento EPS foi estudada para edifícios de diversas tipologias, tendo como base o clima português, sendo estas um apartamento, moradia, clínica privada, escola e um supermercado, localizados em diferentes zonas climáticas de inverno e verão. A espessura de isolamento foi alterada, assim como a sua posição na envolvente, tendo sido aplicada no exterior, na caixa de ar ou no interior, retratando assim os principais métodos utilizados para isolar um elemento da envolvente opaca [25]. O estudo demonstra que a solução com melhor Custo Anual Equivalente (CAE) é o isolamento na caixa de ar, independentemente da tipologia do edifício ou da zona climática, pelo facto de apresentar valores de transmissão de calor praticamente iguais aos do isolamento pelo exterior, mas com custos de mão de obra reduzidos. Devido à reduzida variação do consumo energético dos edifícios estudados com a zona de aplicação do isolamento, a solução mais económica é a que apresenta os custos de aplicação menores, sendo neste caso o isolamento aplicado na caixa de ar [25].

Apesar de apresentar o mesmo U , o isolamento interior é pior que as restantes soluções, aumentando ligeiramente o consumo energético dos edifícios, enquanto o isolamento pelo exterior é a melhor solução do ponto de vista de consumo energético. Este aumento não é provocado por um incremento nas trocas de energia com o exterior, mas sim devido ao desaproveitamento da inércia térmica das paredes. Por outro lado, o isolamento pelo exterior permite corrigir as pontes térmicas e ao mesmo tempo continuar a aproveitar a inércia térmica das paredes [25]. Esta melhoria do desempenho energético do edifício pode, em alguns casos, atingir os 8% [13].

De um ponto de vista térmico, a implementação de isolamento em edifícios residenciais é sempre vantajosa independentemente da zona climática em que se encontram. No entanto, economicamente, a espessura ótima varia entre 5 cm (I1-V1) e 10 cm (I3-V3), consoante a zona climática. Já no caso de edifícios de comércio e serviços, verifica-se que a espessura ideal em termos térmicos é bastante inferior para a zona climática I1-V1, atingindo os 2 cm no caso do supermercado. De um ponto de vista económico constata-se que o maior benefício é mesmo não isolar o edifício quando se trata de

edifícios de comércio e serviços. Nestes casos, o valor da espessura aumenta ligeiramente à medida que a severidade da zona climática aumenta. [25].

Para edifícios de comércio e serviços em zonas climáticas I1, onde as cargas térmicas internas são superiores, a implementação de uma espessura de isolamento acima da energeticamente ideal traz desvantagens devido ao aumento do consumo energético para arrefecimento do espaço [25].

O aumento da potência de arrefecimento com a espessura de isolamento para espaços com cargas internas superiores também pode ser observado num estudo em que a energia anual consumida para arrefecimento numa habitação foi comparada para uma residência com ocupação baixa e outra com uma ocupação superior (família numerosa). Os resultados indicaram que a habitação com uma ocupação superior verificou aumentos ligeiros na potência de arrefecimento à medida que a espessura de isolamento nas paredes e cobertura foi aumentando [33].

O aumento da potência de arrefecimento devido ao incremento na espessura de isolamento é evidente para o supermercado na zona climática I1, algo que não se verifica em mais nenhuma zona climática. No entanto, é possível observar que o aumento da espessura de isolamento acaba sempre por reduzir o consumo energético para a potência de aquecimento, tanto no edifício de comércio e serviços, como na moradia.

Constata-se ainda que, dada a natureza das zonas climáticas mais severas (I3-V3), o consumo energético para os edifícios localizados nestas é sempre superior.

No caso do edifício de habitação, observa-se que a implementação de isolamento é sempre vantajosa, independentemente da zona climática. Isto sugere que o comportamento do consumo energético face ao aumento da espessura de isolamento é fortemente dependente da tipologia do edifício e das atividades que são praticadas nestes, tal como indicado em Raimundo A et al. [25].

A cobertura de um edifício apresenta-se como o elemento da envolvente opaca com maior exposição à radiação solar. Parte da radiação é refletida pela cobertura enquanto a restante é absorvida conduzindo a um fluxo de calor para o interior do espaço. Em Portugal, 93% das coberturas são do tipo inclinada revestida a telhas cerâmicas ou de betão e conclui-se que as anteriores a 1990, provavelmente não possuem isolamento térmico caso não tenham sido alvo de reabilitação [34]. A Figura 2.6 ilustra as soluções construtivas mais utilizadas em Portugal, de acordo com o ano de construção.

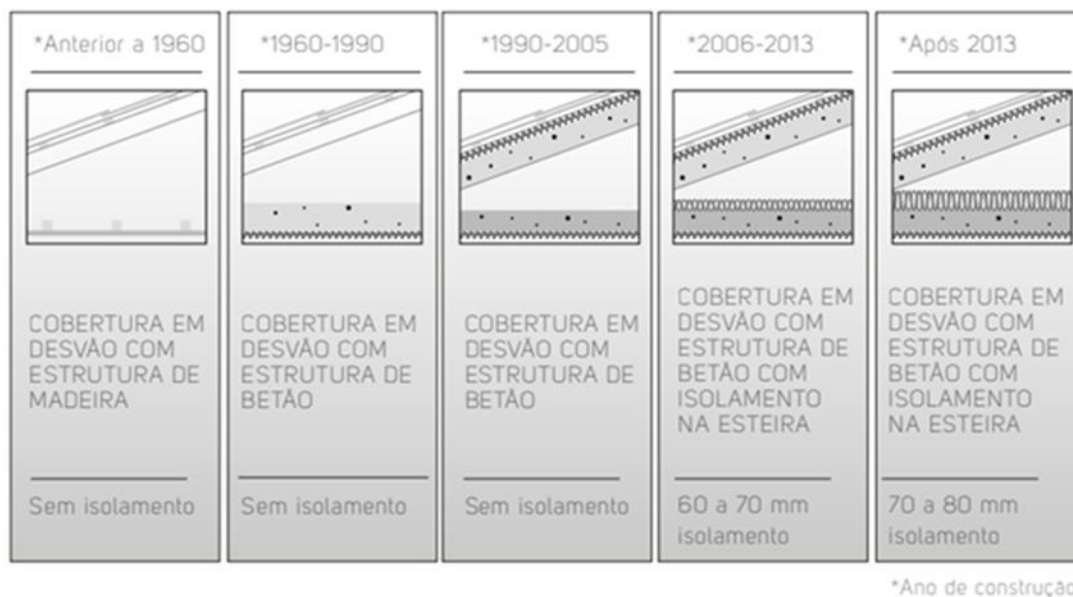


Figura 2.6 – Coberturas em Portugal em função do ano de construção [34].

Os materiais utilizados para o isolamento das coberturas, são no geral, os mesmos que constituem as paredes exteriores.

O coeficiente global de transmissão de calor para uma cobertura inclinada, isolada e não isolada, constituída por blocos de betão normal com uma espessura de 0,33 m a 0,35 m (Figura 2.7), pode ser observada na Tabela 2.4.

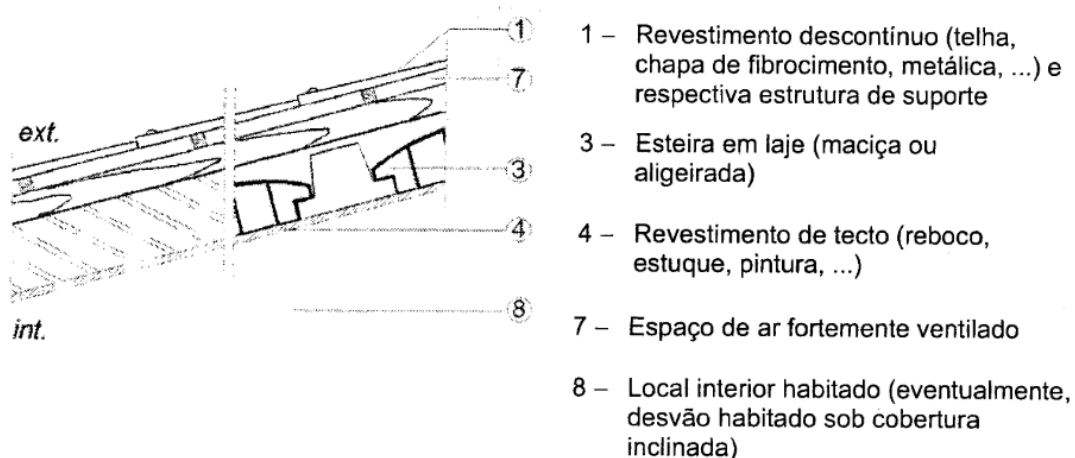


Figura 2.7 - Constituição de uma cobertura inclinada sem isolamento [24].

A análise da Tabela 2.4 permite constatar que o aumento da espessura de isolante para 60 mm provoca uma redução no valor do U de 22,4%. Quando comparado com uma cobertura sem isolamento, traduz-se num aumento de 72%, realçando a importância da reabilitação dos edifícios mais antigos, cuja construção não tem em conta o isolamento térmico da envolvente.

Tabela 2.4 - Coeficiente global de transmissão de calor para uma cobertura inclinada isolada com 40 mm e 60 mm de EPS e não isolada [24].

Elemento Isolante	λ [W/(m.K)]	R [m ² .K/W]	U [W/(m ² .K)]
Sem isolamento	-	-	2,1
EPS (e=0,04)	0,040	1,000	0,76
EPS (e=0,06)	0,040	1,500	0,59

Num caso de reabilitação de um edifício residencial em Lisboa não isolado, com o intuito de promover a eficiência energética, o isolamento da cobertura provou ser a medida que mais variou o CEP, sendo a reabilitação deste elemento opaco a que possui a melhor relação custo-benefício, enquanto o pavimento se apresenta como a que menos influencia o CEP [26]. A espessura ideal de isolamento para a cobertura foi de 60 mm de EPS e qualquer valor acima deste provou ser desvantajoso de um ponto de vista financeiro [26].

O XPS foi utilizado como material de isolamento para o estudo do Ponto Ótimo de Rentabilidade Económica (PORE) de uma cobertura de um edifício desprovido de isolamento no Porto. Constatou-se que a utilização de XPS com uma espessura de 50 mm é a ideal de um ponto de vista técnico-económico, permitindo reduzir o U da cobertura em aproximadamente 71%. A alteração da espessura de isolamento dos restantes elementos opacos para 50 mm de XPS e EPS para as paredes, bem como a implementação de equipamentos mais eficientes para AQS, permitiu reduzir o CEP em aproximadamente 73% (kWh/(m² ano)) [31].

Uma estratégia complementar para a melhoria do desempenho térmico das coberturas, de elevada exposição solar, é a aplicação de tintas refletoras, que tem como objetivo aumentar a refletividade e emissividade do material em que são aplicadas [32]. Estas tintas permitem reduzir a energia de radiação absorvida pelo material, diminuindo assim os fenómenos de condução na cobertura responsáveis pelo aquecimento do espaço a climatizar.

Neste âmbito surge o conceito de *Cool Roofs* que são coberturas que possuem índices de refletividade solar (SR) e de emissividade variados, de forma a atingir o resultado desejado [35]. A refletividade solar permite que em climas quentes, a cobertura reflita a maior parte da radiação solar incidente, reduzindo a sua temperatura superficial. [35][35]

Por outro lado, em condições de menor radiação solar, a emissividade baixa (absorvidade elevada) apresenta vantagens pois leva a que a temperatura superficial

da cobertura seja superior à do ar exterior, fazendo com que ocorra uma diminuição das necessidades de aquecimento do espaço, fruto da diminuição do diferencial de temperatura entre a superfície exterior da cobertura e o ambiente interior. A solução para climas que não sejam predominantemente quentes ou frios não é óbvia e carece de estudos mais detalhados [36].

No entanto, através de um estudo de simulação realizado a partir de um nível base de refletividade de 0,2, foram realizados incrementos de 0,2 e 0,45 na mesma, tendo sido obtidas coberturas com valores de refletividade de 0,4 e 0,65. Consequentemente, foi determinada a energia de arrefecimento e aquecimento para ambos os casos, para diversos países. A gama de valores para a energia de arrefecimento, associada a refletividades de 0,4 e 0,65 pode ser observada na Tabela 2.5.

Tabela 2.5 - Redução do consumo energético para arrefecimento em função da refletividade solar da cobertura (adaptado de [37]).

	0,4	0,65
Consumo energético de arrefecimento [kWh/m ²]	6,8 a 29	8,4 a 48

Adicionalmente, observou-se que apesar do consumo energético para aquecimento sofrer com o aumento da refletividade, a redução no consumo para arrefecimento é superior, na grande maioria dos casos, tal como pode ser observado na Figura 2.8.

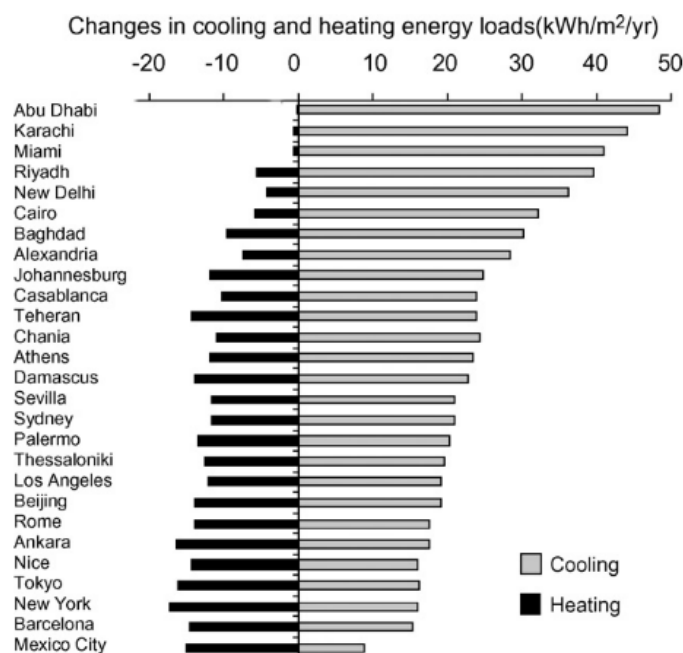


Figura 2.8 - Alterações ao consumo energético de arrefecimento e aquecimento para uma refletividade solar de 0,65 [37].

É ainda possível evidenciar que o aumento da refletividade tem uma maior influência em coberturas com um mau isolamento, isto é, coeficientes de transmissão térmica superiores. Sendo o seu efeito reduzido caso a cobertura apresente um bom nível de isolamento. A variação da poupança no consumo energético de climatização, ou seja, a diferença entre a energia de arrefecimento e a de aquecimento, em função do coeficiente de transmissão térmica, foi estudado em Abu Dhabi, Nova Deli, Casablanca, Damasco e Tóquio, para um SR de 0,4 onde foi possível observar o mesmo comportamento que retrata uma poupança energética com o aumento do U, atingindo cerca de 130 kWh/(m².ano) em Casablanca, para um U de aproximadamente 3 W/(m².K).

2.4.2 Vãos Envidraçados

De todos os elementos constituintes da envolvente de um edifício, os vãos envidraçados são os mais suscetíveis às variações das condições exteriores, como a temperatura, radiação solar e vento que afetam diretamente a eficiência energética e o conforto térmico no espaço.

O vão envidraçado é constituído essencialmente pela porção de vidro, responsável pela passagem de radiação solar para o espaço, permitindo tirar proveito da iluminação natural, e pela caixilharia, normalmente produzida em alumínio com corte térmico, em madeira ou PVC. Ao conjunto dá-se o nome de vão envidraçado e o seu coeficiente global de transmissão térmica (U) quantifica a facilidade que este tem em permitir a passagem de calor para dentro e fora do espaço, sendo o parâmetro a minimizar na seleção do conjunto.

A constituição da porção de vidro pode ser alterada por forma a contribuir para a diminuição do valor de U, existem várias soluções possíveis capazes de produzir este efeito tais como a adoção de vidros duplos ou triplos (Figura 2.9) com caixa de ar ou com gases que possuam uma condutividade inferior, tais como o argón e krypton [32]. Podem também ser utilizados vidros com películas capazes de garantir uma resistência térmica superior e reduzir fenómenos de condensação durante o inverno [32].

Atualmente, é comum encontrar vãos envidraçados duplos dado que o seu U é inferior ao do vidro simples, apresentando uma boa relação custo benefício. Os valores do U para vidros duplos de baixa emissividade ($\epsilon = 0,4$), com uma espessura da caixa de ar de 16 mm, para diferentes tipos de caixilharia podem ser consultados na Tabela 2.6.

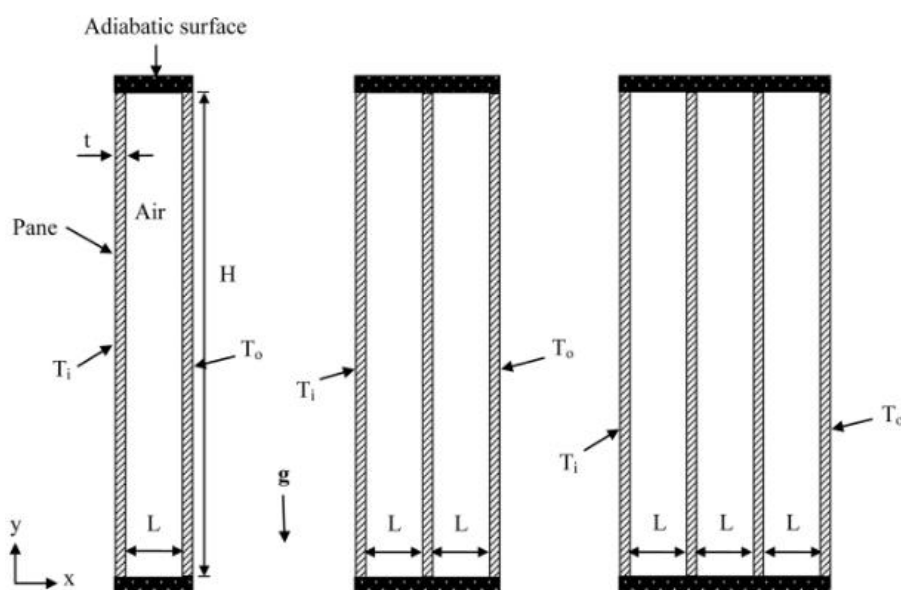


Figura 2.9 - Representação de um vão com vidro duplo, triplo e quádruplo [38].

Tabela 2.6 - Coeficiente global de transmissão térmica de vidros duplos, de correr, em função do material da caixilharia (adaptado de [24]).

Material da caixilharia	e [m]	Tipo de janela	U [W/m ² .K]
Madeira	0,016	De correr	2,6
Metálica (com corte térmico)	0,016	De correr	3
PVC	0,016	De correr	2,5

Num estudo relativo a soluções ótimas de vãos envidraçados tipicamente utilizados em Portugal (classe A a H), para várias zonas climáticas e tipos de edifícios (escola, clínica, apartamento, moradia, banco e supermercado) concluiu-se que do ponto de vista energético os vãos de classe A e B são os ideais independentemente da zona climática. A classe energética B mostra ser superior à A para ambos os tipos de residência, o supermercado, escola e para o banco caso este se encontre na zona climática 1. Isto sucede devido às características dos vãos de classe A, em que o seu reduzido fator solar (g), acaba por não compensar a redução do coeficiente de transmissão térmica do vão envidraçado não considerando dispositivos de proteção solar.

O consumo energético dos edifícios é fortemente dependente da sua tipologia e atividade, sendo que para edifícios que possuam cargas internas consideráveis, a área envidraçada deve ser reduzida ao máximo para minimizar o consumo energético devido ao arrefecimento do espaço. Além disso, a ocupação do edifício também influencia o

impacto que os vãos envidraçados têm nos edifícios. De uma forma geral, edifícios com ocupação permanente têm uma dependência maior do tipo de vão, enquanto edifícios com ocupação intermitente são menos dependentes da escolha do tipo de vão envidraçado.

Do ponto de vista puramente económico (CAE), os vãos envidraçados de classes energéticas inferiores, como F, G e H são sempre mais vantajosos devido aos seus custos reduzidos de aquisição quando comparados com os de classe superior predominando a classe F na maioria dos edifícios como a escolha que leva aos menores custos ao longo do ciclo de vida do edifício.

A diferença entre os critérios utilizados na escolha dos vãos envidraçados pode ser observada na Figura 2.10, em que os de classe superior apresentam as maiores poupanças energéticas, na maioria dos casos, enquanto são os que apresentam um custo anual equivalente superior utilizando um critério económico [39].

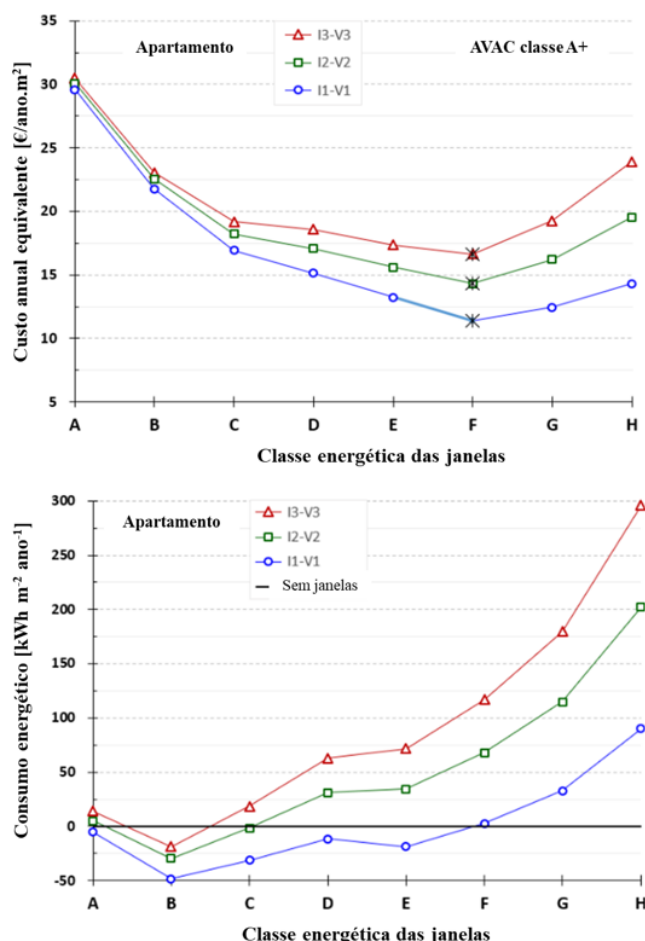


Figura 2.10 - CAE e consumo energético num apartamento, para vãos envidraçados de diferentes classes (adaptado de [39]).

Também é possível verificar que o CAE dos vãos envidraçados é maior nos extremos da gama de classes disponíveis, isto é, classe A e H. Este comportamento intensifica-se com a severidade da zona climática e é menos impactante nos edifícios de comércio e serviços [39].

A classe de permeabilidade do vão envidraçado deverá ser tida em conta, pois irá influenciar não só o comportamento térmico do espaço, mas também permite minimizar as infiltrações de ar indesejadas, contribuindo para a regulação do caudal de ar novo para efeitos de QAI, caso se tire proveito da ventilação natural. A classe de permeabilidade deve ser determinada de acordo com as normas europeias em vigor, nomeadamente as Normas EN 1026, EN 12207, EN 14351-1+A2 e EN 14351-2, e os valores máximos admissíveis para infiltrações de cada uma constam no manual SCE e podem ser consultados através da Tabela 2.7.

Tabela 2.7 - Caudais de infiltração em função da classe de permeabilidade (adaptado de [19]).

Classe de permeabilidade	\dot{V} $\frac{\text{m}^3}{\text{h} \cdot \text{m}^2}$
1	50
2	27
3	9
4	3

Mais do que qualquer outro elemento da envolvente de um edifício, o desempenho dos vãos envidraçados é fortemente dependente da qualidade da sua instalação, podendo alterar a sua permeabilidade até 200% quando comparado com os testes realizados pelo fabricante, salientando a importância do cumprimento dos métodos de instalação enunciados pelo fabricante [40].

O U do vão envidraçado depende não só dos seus aspetos construtivos, mas também da sua permeabilidade ao ar. Apesar da existência de valores de U a cumprir pelos fabricantes, verifica-se que uma vez instalados, esta obrigatoriedade não se verifica, como pode ser observado no caso de estudo tendo como alvos edifícios residenciais na Estónia, onde se verificou que apenas 41% das residências estudadas cumpriam o valor de U obrigatório de 2,1 W/(m²K) devido à permeabilidade insuficiente dos vãos envidraçados [41].

A implementação de uma película transparente de 1 mm do lado interno do vão envidraçado, composta por polietileno, apresenta-se como uma medida com um custo bastante reduzido, mas que proporciona benefícios ao comportamento térmico do vão.

Esta medida permitiu reduzir em 33% as perdas de calor durante a época de aquecimento num vão envidraçado de 24 mm (6 mm vidro + 12 mm caixa de ar + 6 mm vidro) com caixilharia em PVC. A película, além de garantir uma permeabilidade elevada, contribui para a criação do efeito de estufa entre o lado interno do vão envidraçado e o espaço a climatizar, especialmente vantajoso em dias de sol durante o inverno, permitindo que as cargas internas devido à radiação não sejam perdidas tão facilmente através do mesmo, diminuindo assim as necessidades de aquecimento do espaço [42]. A diferença na permeabilidade do vão com e sem a película pode ser observada na Tabela 2.8.

Tabela 2.8 - Permeabilidade do vão envidraçado com e sem a película (adaptado de [42]).

Pressão	\dot{V}_{inf}	\dot{V}_{inf}
	[L/s/m ²] Sem película	[L/s/m ²] Com película
50 Pa	1,285	0,011
75 Pa	1,518	0,027
100 Pa	1,778	0,047

Além das infiltrações, o aumento da permeabilidade com recurso à película transparente permitiu reduzir o valor médio de U em 33%, medido ao longo de três dias, verificando-se uma evolução de 2,67 para 1,79 W/m².K [42].

Os vãos envidraçados são responsáveis, em média, por 47 % das perdas totais de calor numa residência, sendo que as infiltrações são responsáveis por grande parte destas perdas. Aliadas aos elevados valores de U, quando comparados com os restantes elementos da envolvente, fazem com que seja de extrema importância atuar nos vãos envidraçados de um edifício, caso estes representem uma área significativa face à área total exposta do mesmo [42]. Uma reabilitação dos vãos envidraçados com o intuito de promover a sua permeabilidade pode representar uma diferença na energia consumida para aquecimento de 125 kWh/m² [43]. O aumento da classe de permeabilidade dos vãos envidraçados permite também atingir melhores níveis de conforto térmico.

A utilização de vidros com baixa emissividade também é uma medida que permite reduzir o consumo energético de um espaço. Em trabalhos de reabilitação, é bastante viável colocar na parte interior do edifício um vidro com uma película que lhe garanta uma emissividade reduzida, como demonstrado na Figura 2.11.

Os resultados são promissores e mostram ser possível reduzir o consumo energético diário em 12% e anual em 7,5%, dependendo da orientação do edifício e dos vãos envidraçados existentes [44].

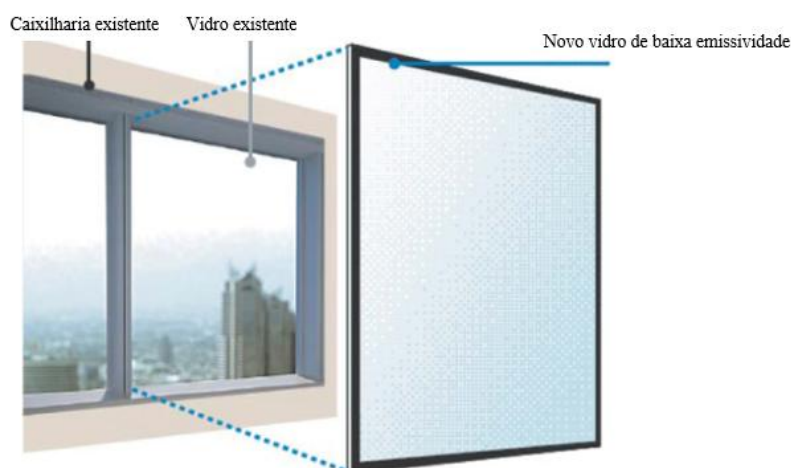


Figura 2.11 - Reabilitação de vidro duplo com vidro de baixa emissividade pelo interior (adaptado de [44]).

2.5 Medidas Ativas

A implementação ou substituição de equipamentos relacionados com AVAC por outros de maior eficiência possui um grande impacto na redução do consumo energético de um edifício.

Globalmente os sistemas AVAC representam a maioria do consumo energético nos edifícios, cerca de 40% do consumo energético total, tanto no setor residencial, cujos sistemas consomem 32% da energia, como no setor terciário, em que o impacto é maior, equivalente a 42% [45].

Neste sentido, torna-se imperativo que sejam realizados esforços no sentido de reabilitar equipamentos existentes por outros mais eficientes, por forma a promover a eficiência energética dos edifícios.

Destacam-se parâmetros como o Coeficiente de Desempenho (COP), aplicável a sistemas de aquecimento, e o Rácio de Eficiência Energética (EER) aplicável a sistemas de arrefecimento, ambas estas grandezas traduzem o quociente entre potência térmica que se obtém (quente ou frio) e a energia elétrica absorvida à rede necessária para o funcionamento do circuito frigorífico. Atualmente, a etiqueta energética dos equipamentos permite que o consumidor consiga tomar a melhor decisão ao apresentar a classe energética do equipamento, bem como o seu COP e EER, facilitando a introdução no mercado de tecnologias mais eficientes.

O conceito de COP e EER sazonal, SCOP e SEER respetivamente, traduzem medidas de eficiência energética mais práticas dado que a avaliam ao longo de todo o ano, tendo

em conta todas as variações de temperatura exterior e interior a que o equipamento está sujeito, bem como possíveis ciclos de descongelamento. Visto que alguns equipamentos chegam a sofrer variações de temperatura de 40 °C do ar exterior, torna-se necessário avaliar a eficiência anual deste equipamento para que possa ser tomada a melhor decisão quanto à sua escolha.

A produção local de energia apresenta-se como outro fator capaz de reduzir significativamente o consumo energético de um edifício e de entre as tecnologias disponíveis, destacam-se os painéis solares e fotovoltaicos, cujo custo de investimento tem vindo a diminuir nos últimos anos devido aos avanços tecnológicos. Além disso, o custo crescente da energia, bem como o aumento da eletrificação a nível global, fez com que o período de retorno associado aos painéis fotovoltaicos diminuísse, apresentando-se como uma das principais tecnologias de captação de energia renovável implementada nos edifícios atualmente.

Aproximadamente 40 % do consumo total de energia primária pode ser atribuído ao setor dos edifícios. Neste sentido, tecnologias como as bombas de calor têm vindo a destacar-se cada vez mais como uma solução eficiente para efeitos de aquecimento e arrefecimento dos edifícios, substituindo equipamentos tradicionais que utilizam combustíveis fósseis para a produção de calor, contribuindo assim para a descarbonização do setor.

Graças à sua elevada eficiência, as bombas de calor têm vindo a ser cada vez mais adotadas quer nos edifícios residenciais, quer nos edifícios de maior dimensão como os de comércio e serviços. As vendas deste equipamento aumentaram em 39% em 2022, atingindo um total recorde de 3 milhões de unidades vendidas na Europa (Figura 2.12). Isto permitiu evitar 52,5 Mega Toneladas de emissões de CO₂, devido à existência de cerca de 20 milhões de bombas de calor até ao ano de 2022 [46]. Os 20 milhões de bombas de calor instaladas entre o período de 1996 e 2022, perfazem um total de 325 TWh de energia útil, dos quais 205,2 TWh provêm de fontes renováveis [46].

As bombas de calor são tipicamente caracterizadas segundo o fluido que permuta calor com o fluido frigorífero, assumindo o modo de funcionamento de arrefecimento. Sendo assim, uma bomba de calor ar-ar, rejeita o calor que absorve do espaço para o ar exterior e, uma vez que arrefece diretamente um espaço, é classificada como sendo de expansão direta. Já as bombas de calor utilizadas por exemplo para AQS, são ar-água ou água-água e, uma vez que não arrefecem diretamente um espaço, classificam-se como expansão indireta ou hidrónicas.

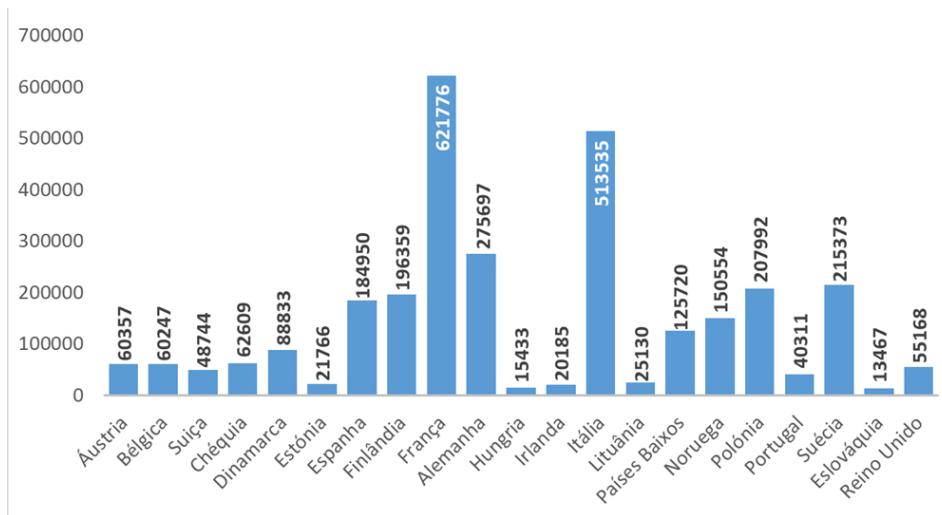


Figura 2.12 - Bombas de calor vendidas em 2022 por país (adaptado de [47]).

Em edifícios residenciais, as bombas de calor ar-ar são as mais utilizadas dada a sua facilidade de instalação e reduzidas potências de aquecimento e arrefecimento envolvidas, sendo para alguns autores, uma das formas mais simples e baratas para melhorar a eficiência energética de um edifício [12]. Por outro lado, para grandes edifícios industriais, as bombas de calor com condensadores arrefecidos a água, possuem várias vantagens, a começar pelas potências térmicas do equipamento, que conseguem ser superiores às de ar-ar para uma menor dimensão, bem como as suas reduzidas dimensões, que devido ao calor específico da água, permite permutar a mesma quantidade de energia com uma massa de fluido inferior quando comparado à massa de ar que seria necessária. Apesar das vantagens que apresentam, as bombas de calor com condensadores arrefecidos a água carece de circuitos hidráulicos adicionais e equipamentos como torres de arrefecimento, fazendo com que apresentem um custo inicial e de ciclo de vida bastante mais elevado. Este sistema permite produzir água quente a temperaturas até 75 °C, aquecer ou arrefecer um espaço, ou uma combinação dos dois, que, aliado à integração com sistemas de produção de energia local como os solares permite atingir eficiências elevadas e colmatar por completo o custo de funcionamento da bomba de calor.

Dada a sua versatilidade, as bombas de calor podem ser utilizadas em diversas indústrias que requerem climatização e aquecimento ou arrefecimento de água para processos. Num caso verificado numa indústria metalomecânica na Áustria, as bombas de calor são responsáveis por arrefecer a água de 30 °C até 15 °C para arrefecimento das máquinas existentes, bem como climatizar os espaços necessários, perfazendo um total de 500 kW de capacidade de arrefecimento. Ao mesmo tempo, os condensadores contribuem para o AQS e limpeza [48]. Para as bombas de calor industriais serem

integradas, é necessário que o calor rejeitado do processo industrial envolvido seja suficiente, a temperaturas elevadas, de aproximadamente 100 °C, a ser permutado no evaporador, com o objetivo de se produzir calor a temperaturas de aproximadamente 150 °C [49].

A substituição de caldeiras a gás natural por bombas de calor apresenta-se como uma das principais medidas ativas no setor residencial para a descarbonização e promoção da eficiência energética. Esta substituição pode representar uma redução no CEP de 13,9% para bombas de calor ar-ar, 22,7% para bombas de calor ar-água, 59,4% para bombas de calor geotérmicas água-água e 62,2% para geotérmicas (água) água-água, representando 72,6, 65,2, 34,2 e 31,9 kWh/m² de CEP respectivamente, sendo que o caso base (caldeira GN + sistema split), apresenta um CEP equivalente a 84,4 kWh/m² [50]. É nas medidas que possuem a maior poupança energética onde se verifica a maior redução das emissões de CO₂ face à situação base, de 19,2 para 7,1 kgCO₂/m², equivalente a uma redução de 63,1% [50]. Apesar da substituição por ambas as bombas de calor geotérmicas ser a que apresenta a maior poupança em termos energéticos, verifica-se que são as que apresentam os maiores custos de investimento, como apresentado na Figura 2.13. Salientando mais uma vez um dos motivos que fazem com que as tecnologias mais eficientes possuam uma introdução no mercado mais lenta e difícil, devido aos seus custos de investimento consideravelmente mais elevados.

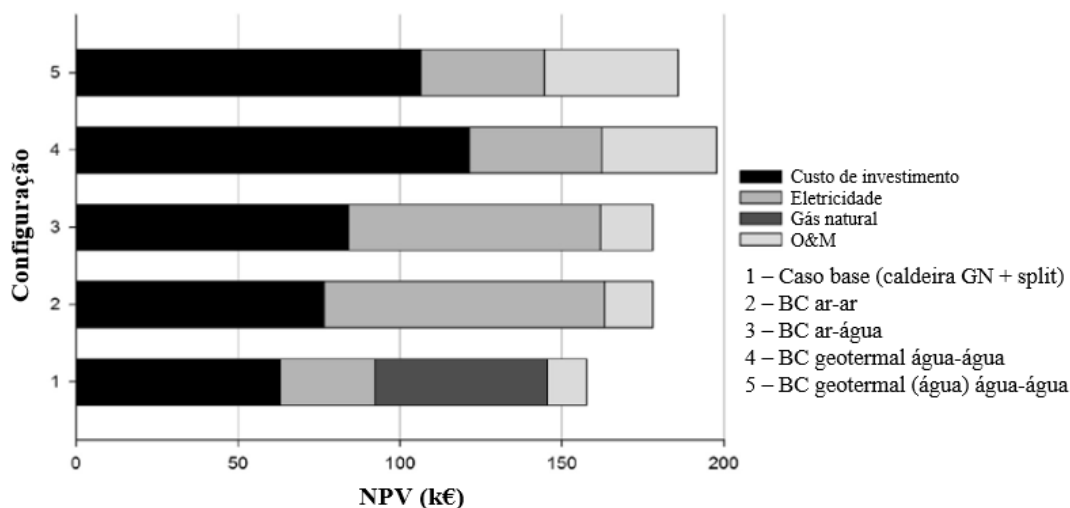


Figura 2.13 - Comparação de custos de configurações de BC com caldeira GN + sistema split (adaptado de [50]).

2.6 Simulação Dinâmica Multizona

Os softwares de simulação dinâmica multizona são ferramentas utilizadas para modelar e analisar o comportamento de edifícios e outros espaços com múltiplas zonas, particularmente no contexto do desempenho térmico, fluxo de ar e consumo energético. Estes programas simulam a forma como diferentes áreas (ou zonas) interagem entre si e com fatores ambientais externos ao longo do tempo.

Os programas utilizados para efeitos de simulação dinâmica devem ser acreditados pela norma ASHRAE 140, destacando-se o TRACE 700, EnergyPlus, Hourly Analysis Program (HAP), entre outros.

2.6.1 EnergyPlus

O EnergyPlus é um programa gratuito, de código aberto, que permite ao utilizador simular o comportamento térmico e consumo energético de um edifício para o aquecimento, arrefecimento, ventilação, iluminação e processos.

As simulações realizadas têm em conta os elementos da envolvente, os sistemas de climatização existentes, bem como a geometria do edifício.

Este programa apresenta algumas características e capacidades, tais como [51]:

- Condução de calor em condições transientes através de elementos da envolvente como paredes, coberturas e pavimentos, utilizando funções de transferência de condução;
- Cálculos de brilho e iluminação, tendo em conta o conforto visual;
- Modelo combinado de transferência de calor e massa, que tem em conta o fluxo do ar entre zonas;
- Variar a posição de cortinas e estores, bem como realizar balanços de calor que determinam a energia solar absorvida pelos vãos envidraçados;
- Modelos de conforto térmico baseados no tipo de atividade, temperatura de bolbo seco interior, na humidade, etc.;

Apesar das vantagens apresentadas, a modelação neste programa não é simples, nem intuitiva. Por esta razão foram criados outros programas que realizam a interface entre o EnergyPlus e o utilizador, para que este tenha mais facilidade em usar o programa, melhorando significativamente a eficiência de trabalho. Destes, destaca-se o DesignBuilder, amplamente utilizado pelas empresas atualmente. Este programa permite determinar grandezas como o consumo anual de energia, temperaturas

máximas e dimensões dos componentes dos sistemas de AVAC, sendo frequentemente utilizado para [52]:

- Visualização do espaço e do sombreamento a que este está sujeito;
- Dimensionamento de equipamentos;
- Análise de edifícios que usufruem de ventilação natural;
- Consumo energético dos edifícios;

Apresenta ainda a vantagem de permitir ao utilizador realizar a modelação geométrica do edifício, bem como a sua parametrização num só programa, algo que não acontece com outros. Apesar de ser bastante completo, é um programa que não é gratuito, fazendo com que muitas vezes se opte por outros programas.

2.6.2 Hourly Analysis Program

Este programa, desenvolvido pela Carrier, tem como principal objetivo o dimensionamento de sistemas AVAC e a análise dos consumos energéticos associados, bem como os custos inerentes à operação de uma determinada instalação [53].

As simulações são realizadas hora a hora, para todos os equipamentos de AVAC, bem como para a iluminação e outros equipamentos existentes. Os resultados são apresentados num relatório final, onde é possível analisar grandezas como a potência de aquecimento e arrefecimento, caudais de ar envolvidos, caudal de água se aplicável, potência dos ventiladores, condições obtidas nos espaços, entre outros. Estes dados podem então ser usados para determinar o consumo energético anual e os seus custos.

Este será o programa utilizado nesta dissertação, cuja licença é fornecida pelo ISEL.

Uma vez que a utilização do EnergyPlus por si só é difícil e pouco intuitiva, esta dissertação irá utilizar o HAP como programa de simulação, cuja utilização é mais simples, conseguindo obter os resultados considerados relevantes para este trabalho de igual forma.

3 Metodologia e Caracterização

A nave oficial número 1 da CARRIS, localizada no piso 1, pertencente ao complexo de Miraflores, é uma das três existentes, onde as operações de manutenção de parte da frota da CARRIS são realizadas. Nesta nave, realizam-se intervenções de manutenção associadas a avarias de maior gravidade, o que implica um perfil operacional distinto das restantes. Devido à natureza das operações executadas, verifica-se uma menor utilização de equipamentos de combustão interna em comparação com as outras naves, reduzindo assim a emissão de poluentes e a carga térmica interna gerada por estes equipamentos.

Em termos de ocupação, o número médio de trabalhadores presentes na nave é de 35 indivíduos, em horário laboral compreendido entre as 8:00 às 17:00 horas, com uma pausa para almoço entre as 12:00 e as 13:00 horas.

Uma vez realizada a caracterização do edifício, os dados são introduzidos no programa HAP [53], desenvolvido pela Carrier e de seguida são elaborados os diversos modelos de simulação apresentados.

Este programa foi escolhido pois apesar de não permitir realizar a modelação geométrica do espaço ao contrário de outros, é relativamente intuitivo e de simples utilização, cumprindo todos os requisitos referentes à simulação dinâmica do comportamento térmico do edifício, permitindo analisar consumos energéticos e dimensionar equipamentos adaptados às melhorias propostas.

3.1 Caracterização do edifício

Este edifício, cuja planta se encontra representada na Figura 3.1, foi construído na década de 80 e apresenta uma área útil de 6528 m², com um pé direito de aproximadamente 9,3 m. Devido à sua antiguidade, o edifício encontra-se desprovido

de qualquer tipo de isolamento e a sua cobertura é constituída integralmente por chapa zincada com 1 mm de espessura. Adicionalmente, existem diversas aberturas na envolvente criadas com o propósito de melhorar a ventilação do espaço, auxiliadas por vários ventiladores colocados a uma cota superior que são acionados manualmente e ocasionalmente por forma a diluir a concentração de metano proveniente dos equipamentos no espaço.

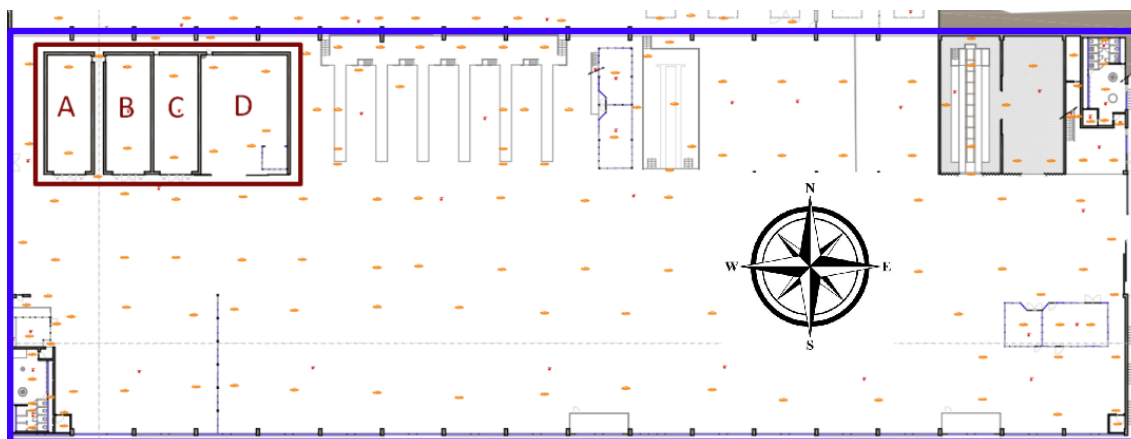


Figura 3.1 - Área útil da nave 1 do piso 1.

A Tabela 3.1 apresenta as principais dimensões do espaço. O volume útil a considerar para os cálculos exclui os espaços denominados por A, B, C e D na Figura 3.1 visto que são estufas de pintura e já se encontram climatizados.

Tabela 3.1 – Dimensões principais da nave.

Pé direito [m]	Área [m ²]	Volume [m ³]
9,3	6528	60708

3.1.1 Paredes Exteriores e Vãos Envidraçados

Visto que não existia informação relativa à constituição da envolvente deste edifício, foi assumida uma alvenaria típica dos anos 80, composta por tijoleira cerâmica, para todas as paredes exteriores.

Além disto, encontram-se inseridos 36 vãos envidraçados na fachada sul (3,1 m x 1,42 m), conforme representado na Figura 3.2. Estes são constituídos por um único vidro de 6 mm de espessura, sem caixilharia. O coeficiente global de transmissão de calor deste envidraçado é de 6,195 W/(m².K), valor retirado a partir da base de dados incluída no software HAP.



Figura 3.2 - Fachada Sul.

A constituição e características gerais das paredes exteriores encontram-se detalhadas no Apêndice B, sendo que os valores de condutibilidade e resistência térmica superficial foram retirados do manual ITE50 [24].

Uma vez que o edifício não possui isolamento, as pontes térmicas planas existentes na fachada sul devido aos pilares estruturais assumem uma relevância significativa na determinação das cargas térmicas do edifício e têm de ser contabilizadas. A caracterização do pano de alvenaria, tendo em conta os pilares, encontra-se representada na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Caracterização das pontes térmicas da fachada sul.

Elemento de Camada	e [m]	λ [W/m.K]	R [m².K/W]	U [W/m².K]	mti [kg/m³]	mt [kg/m²]
Resistência Interior	-	-	0,1300		-	
Pilar em betão armado	0,820	2,00	0,4100	1,702	2350,00	1946
Reboco Tradicional	0,010	1,30	0,0077		1900	
Resistência Exterior	-	-	0,0400		-	

A Tabela 3.3 resume os dados relativos á área total das paredes exteriores.

Tabela 3.3 - Área total das paredes exteriores.

Orientação	Área [m ²]
Norte	170,6
Sul	975,3
Sul (pontes térmicas)	52,9
Este	294,7
Oeste	324,1

3.1.2 Portões e Cobertura

Os portões de acesso para os autocarros, localizados a Este e Oeste (Figura 3.3), possuem uma área significativa, equivalente a 83,3 m² e são integralmente metálicos. Estes elementos constituem um fator relevante para a troca térmica do edifício e, por esse motivo, foram incluídos na análise térmica.

Para o cálculo do U destes portões foi adotado o valor de 7,3 W/(m².K), que consta no Manual SCE para portas metálicas sem área envidraçada e sem núcleo isolante [19].

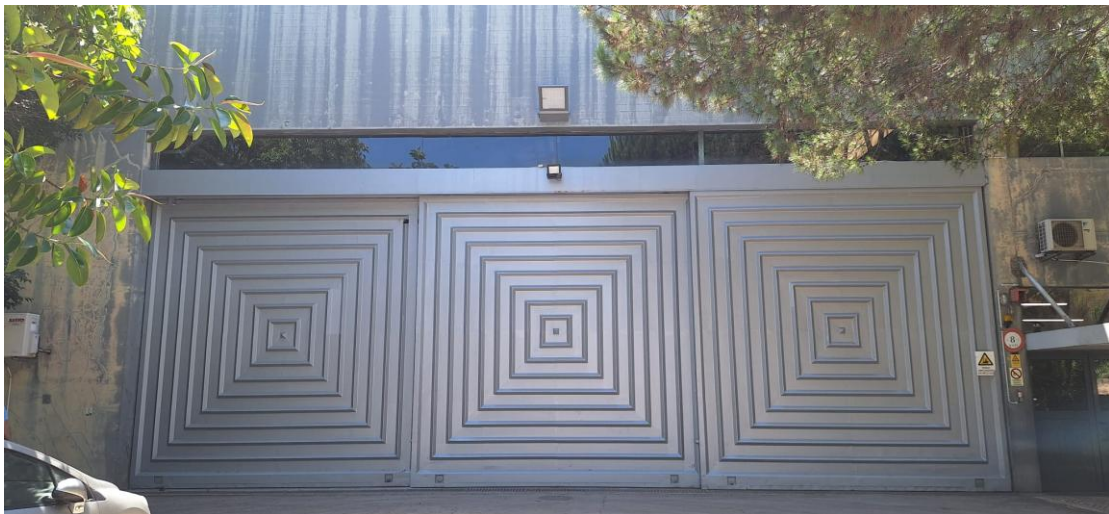


Figura 3.3 - Portões de acesso.

Como pode ser observado através da Figura 3.4, este edifício apresenta uma cobertura com uma geometria irregular e inclinada para sul, o que, aliada ao tipo de material utilizado (chapa zincada), contribui significativamente para o aumento dos ganhos térmicos neste espaço.

Para modelar este efeito térmico da forma mais representativa possível, foram efetuadas simplificações geométricas com o objetivo de determinar a área total exposta e o ângulo de inclinação da cobertura.



Figura 3.4 - Cobertura do edifício.

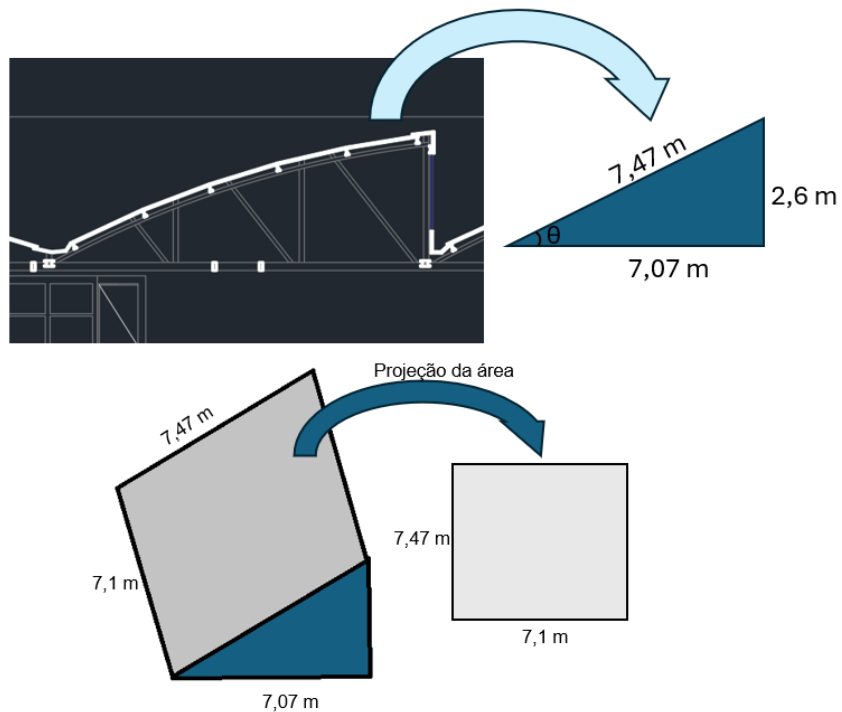


Figura 3.5 - Método de obtenção da inclinação da cobertura e a sua área total exposta a sul.

A Figura 3.5 ilustra estas simplificações, permitindo obter um valor médio de inclinação de aproximadamente 20° de inclinação e uma área de 52,8 m² para uma única curvatura da cobertura. Como ilustrado na Figura 3.6 o edifício contém um total de 108 curvaturas semelhantes, resultando numa área total inclinada para sul equivalente a 5702,4 m².



Figura 3.6 - Cobertura da nave oficial.

3.1.3 Pavimento e Iluminação

A nave oficial possui uma área total de 6528 m², dos quais 2404 m² estão localizados sobre o piso térreo (piso 0) e são climatizados. Para os restantes **4124 m²**, a transmissão térmica do pavimento foi calculada com base nos valores recomendados pelo *Manual SCE* para pavimentos pesados em betão ou laje aligeirada, resultando num U de 3,10 W/m².K.

A iluminação deste espaço foi estimada com base em valores típicos de densidade de potência de iluminação, que podem ser adotados em determinadas tipologias de edifício. Segundo a ASHRAE Standard 90.1-2010 [54] que fornece valores para a densidade de iluminação de diversos espaços, incluindo os edifícios de reparação automóvel como oficinas, equivalente a 7,2 W/m² [54].

3.2 Caso Base e Medidas de Melhoria

Neste subcapítulo são apresentadas as principais propostas de melhoria destinadas a otimizar o desempenho térmico do edifício. As propostas apresentadas encontram-se refletidas nos resultados obtidos no capítulo 4.1, onde as problemáticas principais foram identificadas.

Apesar de cada proposta de melhoria apresentar dados diferentes, a temperatura de projeto exterior é comum a todos os casos e encontra-se apresentada na Tabela 3.4.

Da mesma forma, a iluminação, que foi estimada com base em valores típicos, que podem ser adotados em determinadas tipologias de edifício. A ASHRAE Standard 90.1-2010 [54] fornece valores de referência para a densidade de iluminação de diversos espaços, incluindo os edifícios de reparação automóvel como oficinas, equivalente a 7,2 W/m².

Tabela 3.4 - Temperatura exterior de projeto.

	Verão	Inverno
T _{EXT}	35 °C	4,3 °C

Tal como mencionado no estado da arte (capítulo 2), entre os materiais isolantes disponíveis, o EPS é o que apresenta a melhor relação custo benefício. Esta característica justifica a sua escolha como material base para as intervenções de melhoria da envolvente térmica do edifício analisado, sendo o material a implementar em todas as medidas de melhoria.

3.2.1 Caso Base

O caso base corresponde à análise do edifício no seu estado original, sem qualquer intervenção ou alteração prévia.

Os dados utilizados para elaborar o modelo deste estudo encontram-se apresentados sob o capítulo 3.1, os quais foram introduzidos no software HAP. Através da simulação, foi gerado um relatório detalhado sobre a distribuição e a magnitude das cargas térmicas do espaço, permitindo identificar os principais fatores que contribuem para o seu comportamento térmico.

Esta análise permitiu identificar quais os principais problemas térmicos do edifício, fornecendo uma base para a formulação de estratégias de melhoria que atuem sobre as mesmas, abordadas nos seguintes capítulos.

3.2.2 Medida de Melhoria 1 - Isolamento da Cobertura

A primeira medida proposta consiste na aplicação de isolamento térmico na cobertura do edifício, avaliando o impacto da variação da espessura do material isolante nos ganhos térmicos sensíveis do espaço. Para tal, foram consideradas camadas de EPS com espessuras de 30 mm, 40 mm, 60 mm e 80 mm, com uma condutibilidade térmica de 0,037 W/(m.K), conforme especificado no manual ITE50 [24].

3.2.3 Medida de Melhoria 2 - Isolamento da Fachada Sul (ETICS)

Das paredes exteriores, a da fachada sul foi identificada como a que mais contribui para o aquecimento/arrefecimento excessivo do espaço, representando 69% dos ganhos térmicos totais por transmissão pelas paredes na estação de arrefecimento e 62% na estação de aquecimento.

Para reduzir estas perdas e ganhos térmicos, propõe-se a implementação de um sistema de isolamento térmico pelo exterior (ETICS), descrito no estado da arte, utilizando espessuras de EPS de 30 mm, 40 mm, 60 mm e 80 mm. A espessura dos restantes materiais constituintes do sistema ETICS foi extraída do Manual CIN-k de 2019 [55] e encontra-se detalhada na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 - Constituição do sistema ETICS da fachada sul.

Elemento de Camada	e [m]	λ [W/(m.K)]	R [(m ² .K)/W]	U [W/(m ² .K)]	mti [kg/m ³]	mt [kg/m ²]
Resistência Interior	-	-	0,1300		-	
Reboco Tradicional	0,010	1,30	0,0077		1900	
Tijolo cerâmico	0,250	0,35	0,7143		808	
Reboco Tradicional	0,010	1,30	0,0077	0,614	1900	411
Argamassa de colagem	0,020	1,30	0,0154		1900	
EPS	0,030	0,044	0,6818		1900	
Argamassa de revestimento	0,040	1,30	0,0308		1900	
Resistência Exterior	-	-	0,0400		-	

3.2.4 Medida de Melhoria 3 - Melhoria dos Vãos Envidraçados e Portões de Acesso

Nesta medida simula-se a substituição dos vãos envidraçados existentes na fachada sul da nave oficial, bem como a melhoria do isolamento dos portões de acesso situados a este e oeste.

Os vãos envidraçados existentes serão substituídos por vidro duplo com caixilharia e os portões de acesso passarão a incorporar um núcleo isolante, semelhante ao que se encontra em portas metálicas. Os dados técnicos e as características deste estudo encontram-se apresentados no capítulo 4.4.

3.2.5 Medida de Melhoria 4 - Adoção de Todas as Medidas Anteriores

A última medida consiste na implementação conjunta das estratégias de melhoria apresentadas anteriormente. Para este cenário, foram adotadas espessuras de 60 mm para o isolamento da cobertura e da fachada sul, mantendo-se a substituição dos vãos envidraçados e a melhoria do isolamento dos portões de acesso.

4 Resultados

Neste capítulo, são apresentados e discutidos os resultados obtidos a partir das medidas de melhoria propostas anteriormente. A análise será realizada de forma quantitativa e qualitativa, com o objetivo de avaliar o impacto de cada solução no desempenho térmico do edifício.

4.1 Caso Base

Os dados relativos aos ganhos e perdas térmicas encontram-se apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Ganhos/perdas térmicas pela envolvente.

CARGAS DO ESPAÇO	ARREFECIMENTO (Ago 1600)			AQUECIMENTO (Jan 0800)		
	Área	ODA BS / BH 32,9 °C / 20,8 °C		Área	ODA BS / BH 4,3 °C / 3,9 °C	
		\dot{Q}_s [W]	\dot{Q}_L [W]		\dot{Q}_s [W]	\dot{Q}_L [W]
Ganhos solares de Janelas	157 m ²	32916	-	157 m ²	-	-
Paredes	1494 m ²	11957	-	1494 m ²	25398	-
Transmissão pela cobertura	5724 m ²	697380	-	5724 m ²	497271	-
Transmissão pelas janelas	157 m ²	6824	-	157 m ²	15264	-
Transmissão por portas	167 m ²	8537	-	167 m ²	19096	-
Transmissão pelo pavimento	4124 m ²	0	-	4124 m ²	8960	-
Iluminação	47002 W	34711	-	0	0	-
Pessoas	35	2039	4666	0	0	0
Carga total	-	794363	4666	-	565990	0

Constata-se que a maior parte das trocas energéticas entre o exterior e o espaço ocorre através da cobertura, seguida dos ganhos solares pelas janelas e, em menor escala, pelas paredes exteriores. Em relação a estas últimas, como seria expectável, a parede da fachada sul representa aproximadamente 69% dos ganhos térmicos totais pela transmissão na estação de arrefecimento e 62% na estação de aquecimento, devido à sua exposição direta à radiação solar.

A composição da cobertura contribui significativamente para o aquecimento excessivo do espaço, sendo responsável por 88% dos ganhos térmicos sensíveis totais na estação de arrefecimento.

Diante desse cenário, as medidas de melhoria propostas visam atuar sobre as três problemáticas principais identificadas, de forma a otimizar o desempenho térmico do edifício, reduzindo as necessidades energéticas associadas aos sistemas de climatização.

4.2 Isolamento da Cobertura

Por observação da Tabela 4.2, é possível verificar uma redução significativa no calor sensível total do espaço dado que este era o elemento da envolvente que apresentava o maior impacto para os ganhos e perdas térmicas do espaço devido às suas características ideais de um ponto de vista de transmissão de calor.

Para quantificar os benefícios térmicos, foi elaborada a Tabela 4.2, que apresenta a redução da carga térmica sensível no espaço, tanto para o modo de arrefecimento quanto para o de aquecimento, em função do aumento da espessura de isolamento.

Tabela 4.2 - Variação do calor sensível total face ao aumento da espessura de isolamento da cobertura.

e_{EPS} [mm]	Modo arrefecimento [kW]	Modo aquecimento [kW]
S/ isolamento	794,36	565,99
30	244,83	159,47
40	212,92	140,01
60	177,87	118,61
80	125,26	107,09

Além de quantificar as melhorias térmicas em termos percentuais face ao caso base (sem isolamento), é importante avaliar a melhoria incremental entre diferentes de espessura de isolamento de EPS, tal como apresentado na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Melhorias térmicas percentuais ao aplicar isolamento na cobertura.

e_{EPS} [mm]	Melhoria face ao caso base		Melhoria face à espessura anterior	
	Modo arrefecimento	Modo aquecimento	Modo arrefecimento	Modo aquecimento
30	69%	72%	-	-
40	73%	75%	13%	12%
60	78%	79%	16%	15%
80	84%	81%	30%	10%

Da análise dos dados que constam da Tabela 4.2 e da Tabela 4.3, observa-se que, apesar das melhorias face ao caso base serem semelhantes em termos percentuais para uma espessura de isolamento de 80 mm, verifica-se uma diferença de 18,17 kW entre os modos de arrefecimento e aquecimento.

Quanto às melhorias entre o aumento de espessuras, verifica-se que não existe uma diferença significativa entre os valores de 40 e 60 mm. No entanto, ao aumentar a espessura para 80 mm, observa-se uma melhoria de 30% para o modo de arrefecimento e apenas 10% para o de aquecimento, correspondendo a uma redução na potência de 52,61 kW e 11,52 kW, respetivamente. Estes resultados sugerem que esta medida é particularmente benéfica na estação de verão, quando os ganhos térmicos devido à incidência da radiação solar na cobertura são mais expressivos.

Os resultados detalhados para os ganhos térmicos em função das diferentes espessuras de EPS encontram-se no Apêndice C. A análise permite verificar a redução gradual da contribuição da cobertura para a carga térmica total sensível, conforme resumido na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Impacto da cobertura no calor sensível total em função da espessura de isolamento.

e_{EPS} [mm]	Impacto no calor sensível total [%]	
	Arrefecimento	Aquecimento
S/ isolamento	88	88
30	61	57
40	55	51
60	46	42
80	40	36

A escolha da espessura ideal de isolamento deve considerar não apenas os benefícios térmicos, mas também uma análise de viabilidade económica. No entanto, observa-se que a maior redução na carga térmica sensível total, excluindo a situação que não

possui isolamento, ocorre no aumento de 40 para 60 mm de espessura, com uma redução de aproximadamente 9 p.p., indicando assim este intervalo como um possível ponto ótimo de retorno energético (PORE).

4.3 Isolamento da Fachada Sul (ETICS)

Primeiramente, como seria de esperar, o impacto que a fachada sul tem no calor sensível total do espaço é menor que o do isolamento da cobertura, tal como pode ser observado na Figura 4.1.

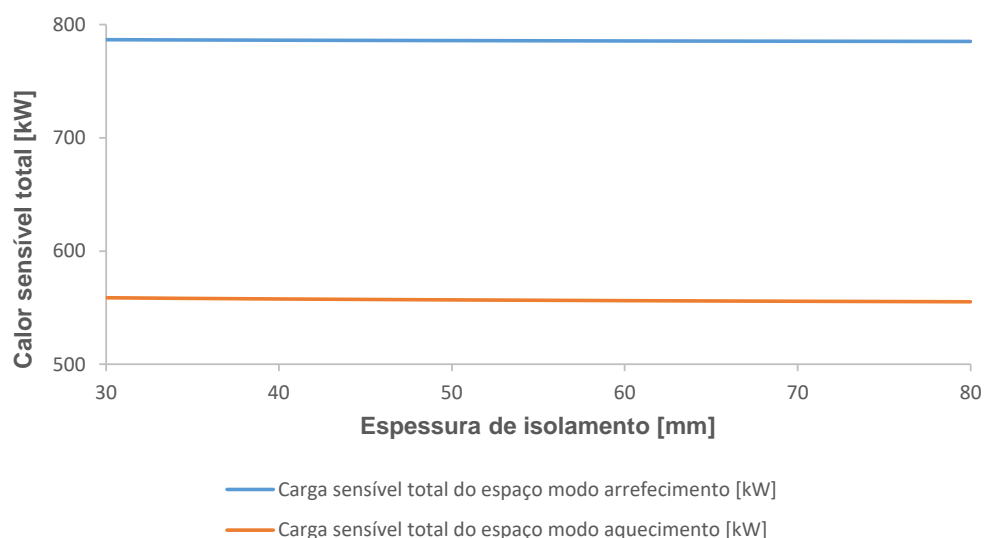


Figura 4.1 - Variação do calor sensível total do espaço com a espessura de isolamento (ETICS).

No entanto, para uma avaliação rigorosa dos benefícios térmicos da implementação do isolamento na fachada sul, é necessário quantificar a influência na carga térmica sensível total do espaço e na potência de arrefecimento e aquecimento, conforme apresentado na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 - Desempenho térmico da fachada sul e o seu impacto no calor sensível total do espaço, em função da espessura de isolamento (ETICS).

e_{Isolante} [mm]	Potência		Impacto no calor sensível total	
	Modo arrefecimento [kW]	Modo aquecimento [kW]	Modo arrefecimento [%]	Modo aquecimento [%]
30	3,7	8,7	0,5	1,6
40	3,3	7,6	0,4	1,4
60	2,6	6,1	0,3	1,1
80	2,2	5,0	0,3	0,9

Ao contrário do que ocorre com a cobertura, o isolamento térmico da fachada sul apresenta maior benefício no modo de aquecimento, atingindo um impacto máximo de 1,6% com uma espessura de 30 mm, dado que anteriormente não existia isolamento. Contudo, o impacto global permanece reduzido.

Semelhante ao que foi realizado no estudo isolamento da cobertura (Medida de melhoria 1), é importante quantificar as melhorias que ocorrem ao aumentar a espessura de isolamento térmico da fachada sul. A Tabela 4.6 quantifica a variação da carga térmica em função do aumento da espessura do isolamento (semelhante ao realizado na Medida de melhoria 1).

Esta quantificação permite ter uma estimativa da espessura ideal em termos custo-benefício, considerando que, em relação ao desempenho térmico espessuras maiores tendem a proporcionar um desempenho térmico superior.

Tabela 4.6 - Melhorias térmicas no grupo de paredes exteriores resultantes da melhoria da fachada sul, em função da espessura de isolamento (ETICS).

e_{isolante} [mm]	Melhoria face ao caso base		Melhoria face à espessura de isolamento anterior	
	Modo arrefecimento [kW]	Modo aquecimento [kW]	Modo arrefecimento [%]	Modo aquecimento [%]
30	8,3	16,7	31	34
40	8,7	17,8	5	6
60	9,3	19,4	7	8
80	9,7	20,4	4	5

Através da Tabela 4.6 verifica-se que a melhorias mais significativa ocorre ao aumentar a espessura de 40 mm para 60 mm, com uma redução de 621 W e 1539 W para os modos de arrefecimento e aquecimento, respetivamente. Apesar disso, esta melhoria é marginal em comparação com a primeira proposta de melhoria (isolamento da cobertura), sugerindo que, de um ponto de vista económico, poderá não ser vantajoso aumentar a espessura além dos 60 mm.

4.4 Melhoria dos Vãos Envidraçados e Portões de Acesso

Os coeficientes de transmissão térmica dos vãos envidraçados foram retirados do Quadro III.2 do Manual ITE50 [24] e encontram-se resumidos na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 - Características do vão envidraçado implementado.

Tipo de vão envidraçado	Tipo de janela	Caixilharia	Espaço de ar [mm]	U [W/m².K]
Vidro duplo	Fixa	Metálica c/ corte térmico	16	3,3

Quanto aos portões de acesso, devido à semelhança entre o material que os constitui, foram utilizados os valores constantes da tabela 32 do Manual SCE [19], referentes a portas metálicas com núcleo isolante, com um coeficiente global de transmissão térmica de 4,50 W/m².K.

A Tabela 4.8 apresenta a redução das trocas térmicas por transmissão dos vãos envidraçados e dos portões, tanto para o modo de arrefecimento quanto para o aquecimento, comparando os novos valores com os que se obtiveram para o caso base (sem melhorias).

Tabela 4.8 - Melhoria dos vãos envidraçados e portões de acesso.

	Arrefecimento			Aquecimento		
	S/ melhorias [W]	C/ melhorias [W]	[%]	S/ melhorias [W]	C/ melhorias [W]	[%]
Vãos Envidraçados	6824	3635	47	15264	8131	47
Portões	8537	5263	38	19096	11772	38

Apesar das melhorias serem iguais em termos percentuais, verifica-se que no modo de arrefecimento, a diferença entre as potências é de 3189 W e 3274 W para os vãos envidraçados e os portões, respetivamente. Enquanto, em termos absolutos, as reduções são mais expressivas no modo de aquecimento, atingindo 7133 W para os vãos envidraçados e 7324 W para os portões, dado que o diferencial de temperatura entre o exterior e o interior é maior neste período.

Semelhante ao que sucedeu na Medida de melhoria referente ao isolamento da fachada Sul (Medida de melhoria 2), estas alterações serão mais benéficas na estação de aquecimento, algo que também se pode concluir ao analisar a Tabela 4.9, que apresenta a melhoria e o impacto que esta tem no calor sensível total do espaço após serem implementadas as medidas mencionadas.

Observa-se ainda uma diminuição de 3,2 kW da potência associada à radiação solar em modo de arrefecimento, face ao caso base, resultando num novo valor de 29,7 kW.

Tabela 4.9 – Melhorias e impacto no calor sensível total do espaço (Medida de melhoria 3).

	Arrefecimento		Aquecimento	
Melhoria	1,2%	9,6 kW	2,6%	14,5 kW
Impacto	4,9%	38,6 kW	3,6%	19,9 kW

Através da Tabela 4.9, verificam-se melhorias superiores em aproximadamente 5 kW no calor sensível do espaço, dado que o diferencial de temperatura entre o exterior e o interior é maior neste período.

4.5 Adoção de Todas as Medidas Anteriores

Os resultados obtidos para a implementação simultânea de todas as medidas encontram-se apresentados na Tabela 4.10.

Tabela 4.10 - Melhorias obtidas com a implementação da Medida de melhoria 4.

	Arrefecimento		Aquecimento	
Melhoria	84%	666,10 kW	83%	471,52 kW

A integração das soluções analisadas resulta numa redução significativa das cargas térmicas, atingindo 666,10 kW em modo de arrefecimento e 471,52 kW em modo de aquecimento. Estes resultados foram obtidos considerando uma espessura de isolamento de 60 mm, sendo expectável que o aumento da espessura para 80 mm acentue ainda mais esta redução, embora não de forma tão expressiva quanto a verificada na transição de 40 mm para 60 mm.

A Tabela 4.11 sintetiza o impacto de cada medida na carga térmica total, em termos percentuais e absoluto comparativamente ao caso base.

Tabela 4.11 - Impacto da implementação de cada medida e potências de arrefecimento e aquecimento associadas.

Medida	Arrefecimento		Aquecimento	
	[%]	[kW]	[%]	[kW]
Cobertura (Medida de melhoria 1)	38	48,5	53	49,9
Vãos envidraçados e portões de acesso (Medida de melhoria 3)	28	35,4	21	19,9
Fachada sul (ETICS) (Medida de melhoria 2)	2	2,7	6	6,1

Os resultados apresentados replicam de certa forma a importância que cada medida apresentava quando implementada isoladamente.

Confirma-se que o isolamento da cobertura continua a ser a Medida de melhoria que representa a maior redução nas necessidades de climatização. No entanto, a sua contribuição relativa para a carga térmica em modo de aquecimento é 15 p.p. superior à verificada em modo de arrefecimento devido ao aumento do diferencial de temperatura. Isto sucede, pois, no modo de arrefecimento, a melhoria dos Vãos envidraçados e dos portões de acesso (Medida de melhoria 3) apresenta um impacto superior em 7 p.p. em relação ao modo de aquecimento. Este impacto tem em conta não só os ganhos por transmissão, mas também os ganhos devido à radiação solar, algo que não acontece no modo de aquecimento em que os ganhos solares são desprezados. Dos 35,4 kW em modo de arrefecimento, 26,6 kW correspondem a ganhos solares e 5,2 kW a ganhos por transmissão através dos vãos envidraçados, sendo o restante atribuído aos portões de acesso.

A implementação do sistema ETICS na fachada sul é a medida com menor impacto global, sendo o seu efeito superior na estação de aquecimento, atingindo o valor de 6%.

Os dados apresentados indicam que, caso seja possível implementar mais do que uma medida, deve ser dada prioridade ao isolamento da cobertura e à melhoria dos vãos envidraçados e dos portões (Medida de melhoria 1 e 3), pois são as que apresentam maiores reduções da potência de arrefecimento e aquecimento.

A implementação de todas as medidas simultaneamente faz com que o seu impacto no calor total sensível seja diferente quando comparado com a sua implementação por si só. Estes dados foram obtidos analisando o impacto térmico que cada componente que integra a Medida de melhoria 4 possui no calor sensível total. Os valores obtidos foram posteriormente comparados com o impacto que cada medida possui quando aplicada individualmente, tal como representado na Tabela 4.12.

Tabela 4.12 - Resumo do impacto no calor sensível total da 1ª, 2ª e 3ª medida.

Medida	Arrefecimento		Aquecimento	
	Impacto [%]	Potência [kW]	Impacto [%]	Potência [kW]
1ª	46,3	82,4	42,1	49,9
2ª	0,3	2,6	1,1	6,1
3ª	4,9	38,6	3,6	19,9

Cruzando os dados da Tabela 4.11 com os da Tabela 4.12, verifica-se que a única medida com uma redução significativa na potência de arrefecimento é a do isolamento da cobertura (Medida de melhoria 1), equivalente a 33,9 kW. No entanto, é de salientar a alteração que o impacto destas medidas possui, quando aplicadas simultaneamente.

Quanto à cobertura, constata-se que em modo de arrefecimento, ocorreu uma redução no impacto de 8,3 p.p. e um aumento de 10,9 p.p. para o aquecimento, apesar de o valor da potência permanecer o mesmo.

A Medida de melhoria dos vãos envidraçados e portões (Medida de melhoria 3) é a que apresenta diferenças mais significativas ao impacto no calor sensível total, verificando-se um aumento em modo de arrefecimento de 23,1 p.p. e 17,4 p.p. para o aquecimento.

Finalmente, a medida de isolamento da fachada sul (Medida de melhoria 2), não apresentou variações significativas e o seu impacto face às restantes permanece insignificante.

Estes resultados sugerem que, ao aplicar as medidas em conjunto, a Medida de melhoria 1 e 3 apresentam-se como os fatores limitantes que mais impacto possuem no desempenho térmico do edifício, devido às suas características térmicas inferiores quando comparadas com o sistema ETICS da fachada sul, bem como a sua área exposta. Desta forma, qualquer melhoria futura com o objetivo de melhorar o comportamento térmico do edifício, deve atuar idealmente sobre estes dois elementos da envolvente. No subcapítulo 4.6.2 é abordado o dimensionamento do equipamento de AVAC, considerando a implementação das medidas que apresentaram maior influência na carga térmica total do espaço (Medida de melhoria 1 e 4).

4.6 Dimensionamento e Análise do Consumo Energético

Após a caracterização da envolvente do espaço, torna-se essencial definir o sistema de climatização e ventilação mais adequado às necessidades do ambiente em estudo. A seleção do sistema deve atender a diversos critérios, nomeadamente a eficiência energética, o conforto térmico, a qualidade do ar interior (QAI) e a viabilidade operacional.

No presente caso, e considerando o elevado volume útil do espaço e a necessidade de assegurar a renovação e movimentação do ar, a fim de promover o arrastamento de partículas e a diluição de poluentes prejudiciais à QAI, bem como a eventual presença de aparelhos de combustão no interior do espaço optou-se por uma unidade de tratamento de ar (UTA) a água. Esta escolha justifica-se pelo facto de este sistema permitir alcançar potências de aquecimento e arrefecimento superiores quando comparado com sistemas de expansão direta, além de apresentar uma maior eficiência energética e um controlo mais preciso da temperatura, devido ao seu comportamento modelar.

Adicionalmente, a UTA a água oferece funcionalidades essenciais para o controlo da qualidade do ar, nomeadamente:

- Filtragem do ar, conforme os requisitos específicos do espaço;
- Humidificação e desumidificação, garantindo níveis adequados de humidade relativa;
- Gestão da ventilação em função da concentração de CO₂, otimizando o consumo energético sem comprometer a QAI;
- Introdução de ar novo, essencial para evitar a acumulação de contaminantes e assegurar um ambiente interior saudável.

No programa utilizado para o dimensionamento, é possível ajustar diversos parâmetros associados à UTA, tais como a temperatura de insuflação de aquecimento e arrefecimento, a presença de sistemas de recuperação de calor, definir a temperatura no espaço, entre outros. A escolha destes parâmetros impacta diretamente a carga térmica do ambiente, tanto na componente sensível como no latente, influenciando a potência necessária para manter as condições desejadas.

Para os modelos elaborados, baseados na análise de desempenho térmico e nas medidas de melhoria adotadas (Medida de melhoria isolamento da cobertura e na que integrou todas as medidas – Medida 1 e 4), foram estabelecidas as seguintes temperaturas para ocupação do espaço, usando como referência as condições de conforto típicas de edifícios de serviços (tendo como consequência a maximização da carga):

- Período de arrefecimento: 24 °C ± 1 K;
- Período de aquecimento: 21 °C ± 1 K.

Nos períodos em que o espaço não se encontra ocupado, os valores destas temperaturas assumem o valor de 28 °C e 15 °C respetivamente.

Além disso, foi também considerado um sistema de recuperação de calor do tipo fluxos cruzados, com uma eficiência estimada de 70%, valor comum neste tipo de equipamentos. Este sistema permite recuperar parte da energia sensível do ar extraído, reduzindo as necessidades de aquecimento e arrefecimento do ar insuflado, contribuindo para uma operação mais eficiente do sistema.

Para garantir a robustez do dimensionamento, foram considerados coeficientes de segurança de 5% para a potência sensível e latente da serpentina de arrefecimento e 10% para a potência da serpentina de aquecimento. Definiu-se ainda um intervalo para a temperatura de insuflação de 12-40 °C, sendo que a temperatura de arrefecimento é

fixa em 12 °C e a de aquecimento varia neste intervalo, dependendo do caudal de ar. Adicionalmente, definiu-se uma diferença de temperatura de 5 K para a água quente e fria.

Por fim, para assegurar uma ventilação adequada, foi imposta 1 renovação por hora, no mínimo, para o caudal de insuflação.

Para melhorar a QAI, há que ter especial atenção à emissão de poluentes resultante do funcionamento dos motores de combustão interna pertencentes à frota existente nesta oficina. A exposição a emissões provenientes destes motores pode contribuir para a degradação da QAI, com potenciais impactos na saúde dos ocupantes e no ambiente interior. De acordo com informações disponibilizadas no site da CARRIS, verifica-se que um dos seus principais autocarros é o MAN 18.310 – III, cujo modelo do motor é o 18.310 HOCL-NL (diesel) [56]. A análise do catálogo do fabricante permitiu obter dados técnicos relativos ao motor, apresentados na Tabela 4.13.

Tabela 4.13 - Características do motor 18.310 HOCL-NL (adaptado de [57]).

Consumo mínimo [g/kWh]	Potência nominal [kW]	Cilindrada [L]
187	265	10,5

Os autocarros em análise utilizam gasóleo como combustível e encontram-se a funcionar ao ralenti no interior da nave. Considerando o volume do espaço e um consumo específico ao ralenti de aproximadamente 1 ml/s [58], é possível concluir que um motor deste tipo emite cerca de 9,36 kg/h de CO₂, o que corresponde a uma concentração de 154 mg/m³.h, equivalente a 89 ppm. Assumindo um espaço de trabalho com um volume de controlo com cerca de 8 m³, esta concentração passa a ser de aproximadamente 200000 ppm ao fim de uma hora.

Esta concentração de CO₂ deverá ser devidamente diluída para efeitos da QAI e segurança dos trabalhadores. Neste sentido, deverá ser introduzido ar novo no espaço, com recurso a uma UTA a água, bem como um sistema de extração localizada.

4.6.1 Caudal Mínimo de Ar Novo

O caudal mínimo de ar novo foi determinado com base no método prescritivo, conforme estipulado na Portaria n.º 353-A/2013 [59], de 4 de dezembro, bem como o método descrito na norma EN 15251:2008 [60].

De acordo com o ponto 2.2 deste documento, o método prescritivo considera dois critérios:

- Critério da ocupação, que define o caudal necessário para diluir os poluentes gerados pelo metabolismo dos ocupantes.
- Critério do edifício, que determina o caudal necessário para diluir os poluentes originados pelo próprio espaço e pelas atividades nele desenvolvidas.

O critério da ocupação tem como objetivo garantir a renovação de ar suficiente para manter a qualidade do ar adequada para os trabalhadores. Os valores utilizados para o cálculo encontram-se na tabela I.04 da Portaria n.º 353-A/2013 [59], de 4 de dezembro que, para um tipo de atividade moderada, típico de trabalhos oficinais apresenta um caudal mínimo de ar novo de $35 \text{ m}^3/(\text{h.pessoa})$. Uma vez que a quantidade média de pessoas a laborar na nave foi estimada em 35, o caudal mínimo de ar novo é obtido através do produto entre o valor retirado da tabela e o número de ocupantes, perfazendo um caudal mínimo de ar novo de 340 L/s.

Por outro lado, o critério do edifício estabelece o método de cálculo para o caudal mínimo de ar novo capaz de diluir a concentração de poluentes devido ao próprio edifício, os seus materiais e as atividades desenvolvidas no mesmo. Recorrendo à tabela I.05 da Portaria n.º 353-A/2013, de 4 de dezembro [59], considerando um edifício com atividades que envolvam a emissão de poluentes específicos, obtém-se um caudal de ar novo equivalente a $5 \text{ m}^3/(\text{h.m}^2)$, que multiplicado pela área do edifício, perfaz um caudal mínimo de ar novo de 9067 L/s.

A norma EN 15251:2008 [60] adota uma abordagem semelhante, baseados na ocupação e no edifício. Contudo esta distingue quatro categorias para ambos os métodos, que representam a percentagem de pessoas insatisfeitas, em que a categoria I deve ser usada para casos que apresentem espaços ocupados com pessoas sensíveis e mais debilitadas.

Dado tratar-se de uma nave oficial, foi adotada a categoria III da norma, adequada para edifícios existentes que proporciona um conforto e QAI adequados. Esta categoria, corresponde a uma percentagem de insatisfeitos de 30% e equivale a um caudal de 4 L/s/pessoa. Para o critério do edifício, considerando as emissões deste como *Non Low*, o caudal mínimo de ar novo equivale a $0,8 \text{ L/s/m}^2$.

De acordo com a norma, o caudal de ar novo mínimo a adotar corresponde à soma entre os caudais obtidos a partir dos dois critérios, enquanto seguindo o descrito na Portaria n.º 353-A/2013, de 4 de dezembro [59], o caudal mínimo a adotar equivale ao maior valor entre os dois, que foram obtidos pelo critério da ocupação e do edifício.

O caudal mínimo de ar novo determinado através de ambos os documentos, vem afetado por um coeficiente que diz respeito à eficácia da ventilação cujos valores se

encontram na tabela I.01 da portaria mencionada. Este coeficiente avalia de que forma um poluente existente no ar é removido do espaço em análise pelo sistema de ventilação, e os seus valores dependem essencialmente do método de ventilação empregue e da diferença de temperatura entre o ar insuflado e o ar presente no espaço a tratar.

Para este caso foi adotada uma eficácia de ventilação do tipo 3 que representa uma insuflação de ar quente junto ao teto pelo menos 8 °C acima da temperatura ambiente e uma extração/retorno junto ao teto, equivalente ao valor de 0,8. Dado que o espaço tem um pé direito elevado, o objetivo é o de remover a massa de ar quente que, devido à sua massa específica, terá tendência para se acumular junto ao teto contribuindo para uma estratificação da temperatura que prejudica o conforto térmico dos ocupantes.

A determinação do caudal de ar novo mínimo a adotar vem dado pela equação 4.1.

$$\dot{V}_{\text{adotado}} = \max(\dot{V}_{\text{an,ocup}}; \dot{V}_{\text{an,edif}}) / \varepsilon_v \quad (4.1)$$

Em que,

\dot{V}_{adotado} – Caudal de ar novo adotado, [L/s]

$\dot{V}_{\text{an,ocup}}$ – Caudal de ar novo obtido através do critério da ocupação, [L/s]

$\dot{V}_{\text{an,edif}}$ – Caudal de ar novo obtido através do critério do edifício, [L/s]

ε_v – Eficácia de ventilação

A Tabela 4.14 resume os resultados obtidos utilizando a Portaria n.º 353-A/2013, de 4 de dezembro e a norma EN 15251:2008 [59] [61].

Tabela 4.14 - Caudal mínimo de ar novo adotado.

Documento	Critério de ocupação [L/s]	Critério do edifício [L/s]	ε_v	\dot{V}_{an} [L/s]	$\dot{V}_{\text{an},\varepsilon}$ [L/s]	\dot{V}_{adotado} [L/s]
Portaria n.º 353-A/2013	340	9067	0,8	9067	11333	11333
EN 15251:2008	140	5222,4		5342,4	6678	

Embora a legislação não obrigue ao cumprimento dos caudais mínimos de ar novo para edifícios industriais, estes devem ser cumpridos na totalidade ou parcialmente sempre que possível, de forma a garantir condições adequadas de ventilação e qualidade do ar interior. Numa primeira abordagem, optou-se por definir o caudal de insuflação com base na concentração de CO₂ do local, influenciada não só pelos ocupantes, mas também pelas atividades desenvolvidas no interior do espaço. Esta estratégia permite estimar o consumo energético associado ao controlo da ventilação, promovendo a

eficiência energética do edifício ao ajustar a taxa de renovação do ar às reais necessidades do ambiente. A implementação deste método visa reduzir o consumo energético anual, nomeadamente através da diminuição da carga térmica associada ao tratamento do ar novo nos períodos de menor ocupação, o que, por sua vez, permite reduzir o consumo das bombas circuladoras do sistema de AVAC. Essa otimização do consumo energético é particularmente relevante, considerando que a climatização e ventilação representam uma parcela significativa do consumo total de energia nos edifícios industriais.

A Portaria n.º 138-G/2021 [17], de 1 de julho estabelece os limiares de proteção para os poluentes físico-químicos e condições de referência para os parâmetros microbiológicos a considerar nos edifícios de comércio e serviços em funcionamento. Relativamente à concentração de CO₂, o limiar de proteção definido é em 2250 mg/m³, com uma margem de tolerância de 30%.

No programa utilizado (HAP) para simulação, é possível definir uma diferença mínima e máxima entre a concentração de CO₂ no interior do espaço e no exterior, que estará associada ao caudal de ar novo mínimo previamente obtido, pelo critério da ocupação e do edifício respetivamente, através da Portaria n.º 353-A/2013, de 4 de dezembro.

Assumindo uma concentração típica de 400 ppm de CO₂ no exterior a diferença mínima imposta foi de 300 ppm, enquanto a máxima foi definida como 900 ppm, como ilustrado na Figura 4.2.

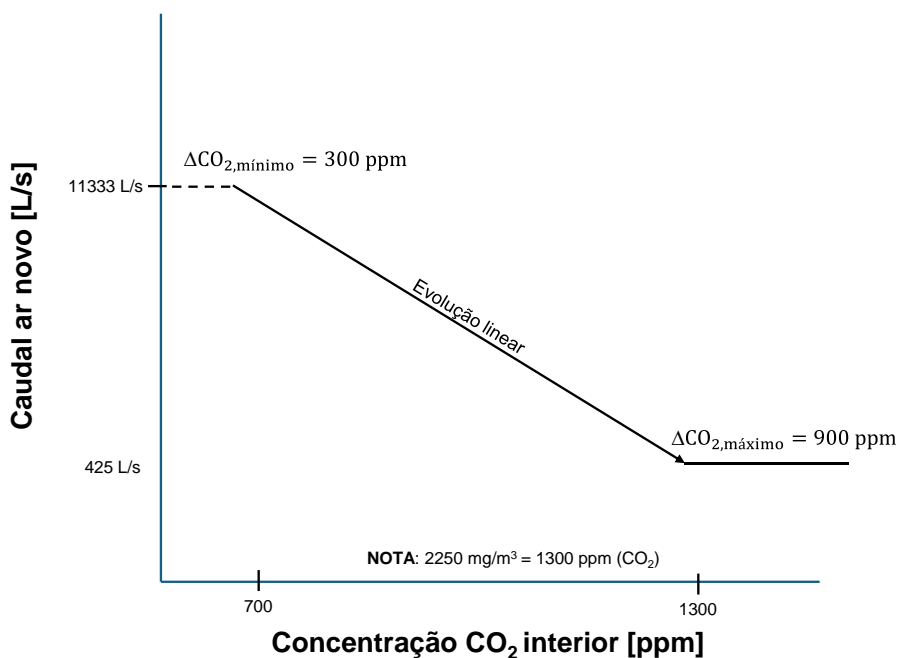


Figura 4.2 – Concentração de CO₂ em função do caudal de ar novo introduzido no espaço.

O capítulo 4.6.4 deste documento apresenta uma análise ao consumo energético, fazendo variar o caudal de ar novo, simulando uma situação em que o seu controlo seria feito através da medição da concentração de CO₂.

4.6.2 Dimensionamento da UTA para a Medida de melhoria 1 e 4

Os principais resultados obtidos para o dimensionamento da UTA associada à medida de isolamento da cobertura e da Medida de melhoria da integração de todas as propostas de melhoria (Medida de melhoria 1 e 4), podem ser consultados através da Tabela 4.15 e Tabela 4.16 respetivamente. Para uma análise mais detalhada, consultar o Anexo A.

Tabela 4.15 - Dimensionamento da unidade de tratamento de ar (Medida de melhoria 1).

	Potência total [kW]	Potência sensível [kW]	Caudal de ar [L/s]	Caudal de água [L/s]
Bateria de arrefecimento	296,7	249,8	16864	14,2
Bateria de aquecimento	168,9	-	16864	8,09

Apesar do caudal de ar novo ter sido definido em 11333 L/s, verifica-se que, devido à condição imposta de 1 recirculação por hora, o caudal de insuflação terá de ser equivalente a 16864 L/s, correspondendo a 5531 L/s de caudal de retorno que por sua vez se irá juntar ao ar novo na caixa de mistura da UTA.

Os resultados obtidos para o dimensionamento da UTA associada à Medida 4 podem ser consultados através da Tabela 4.16.

Tabela 4.16 - Dimensionamento da unidade de tratamento de ar (Medida de melhoria 4).

	Potência total [kW]	Potência sensível [kW]	Caudal de ar [L/s]	Caudal de água [L/s]
Bateria de arrefecimento	263,0	233,0	16864	12,59
Bateria de aquecimento	139,7	-	16864	6,69

Neste caso, verifica-se que, apesar do caudal de insuflação e retorno se manterem inalterados em relação ao dimensionamento anterior, há uma redução das potências térmicas requeridas para o arrefecimento e aquecimento, respetivamente em 33,7 kW e 29,2 kW. Esta redução resulta da implementação de todas as medidas em simultâneo, conduzindo a uma menor carga térmica total no espaço.

Esta redução traduz-se num equipamento com dimensões inferiores às do primeiro caso, o que se traduz em menores consumos energéticos nos sistemas responsáveis pelo tratamento e circulação da água.

as condições térmicas expectáveis no espaço, no dia de projeto, são apresentadas na Tabela 4.17.

Tabela 4.17 - Condições interiores atingidas no dia de projeto (Medida de melhoria 1 e 4).

Arrefecimento		Aquecimento	
T	HR	T	HR
[°C]	[%]	[°C]	[%]
24,5	50	20,7	32,2

4.6.3 Aplicação das Medidas

Para garantir que os equipamentos dimensionados asseguram condições de conforto térmico e QAI, é fundamental analisar a forma como as medidas propostas serão implementadas.

Num espaço como o da nave, em que é gerada alguma carga poluente devido às atividades que ocorrem no seu interior, bem como o pé direito do edifício, torna-se imperativo garantir que o ar novo chega aos ocupantes a uma temperatura adequada e que a localização dos pontos de insuflação e extração promove o arrastamento de partículas indesejadas.

Dá-se principal foco ao local onde se realizam os trabalhos de manutenção aos motores e os trabalhos de soldadura, ilustrada na Figura 4.3. Nestes locais é gerada carga poluente nociva ao ser humano e, portanto, carece de uma extração de ar localizada.

A Figura 4.3 ilustra uma proposta de configuração para os locais de insuflação e extração da nave oficial. Dado que o pé direito do edifício é de cerca de 9 m, torna-se necessário insuflar o ar a uma cota inferior, garantindo o conforto térmico dos ocupantes e evitando a estratificação térmica do ambiente.

Quanto às extrações, estas encontram-se a uma cota superior, tirando proveito da massa específica do ar quente que terá tendência a acumular-se na parte superior da nave. Já em aquecimento, poderá ser considerada a utilização de injetores ou velocidades de insuflação mais elevada dada o pé direito considerável do edifício. Os equipamentos terminais de insuflação, extração e o sistema aerúlico associado deverá estar afastado ou a uma cota que não interfira com a passagem dos autocarros dentro da nave, garantindo a operacionalidade e segurança do espaço.

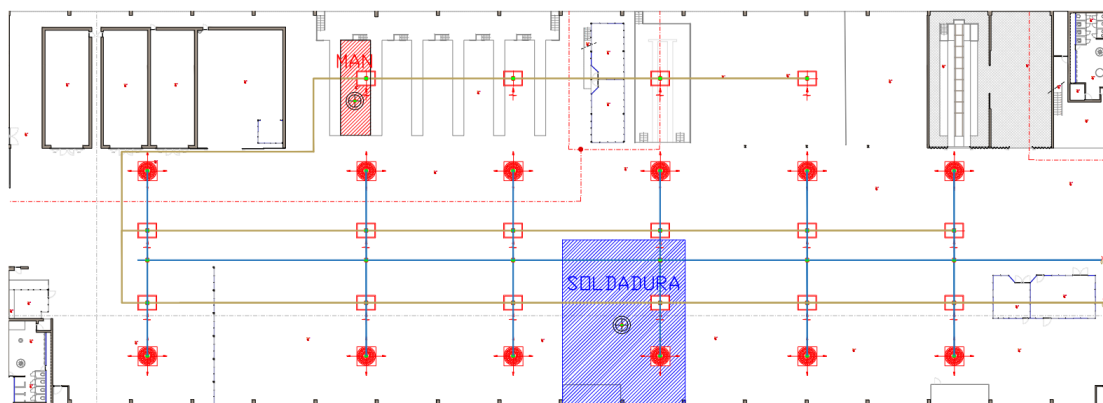


Figura 4.3 - Configuração proposta (azul – Insuflação, castanho – extração, preto – extração localizada).

Uma vez que ambas as UTA dimensionadas possuem pouco caudal de retorno face ao de insuflação, sugere-se a implementação de uma UTAN, que apesar de apresentar um acréscimo à potência de arrefecimento de 29,3 kW, simplifica bastante a instalação, removendo por completo a rede aerúlica associada ao ar de retorno. O caudal adotado para a extração dos fumos resultantes da soldadura TIG resulta de uma pesquisa bibliográfica de onde foi retirado o valor de referência equivalente a 102 L/s [61]. Esta extração poderá ser realizada com recurso a um braço de aspiração próprio para fumos de soldadura [62]. Quanto à extração para a zona de manutenção dos motores, foi considerado que o mesmo caudal de 102 L/s seria adequado para o efeito, recorrendo mais uma vez a um braço de aspiração próprio para gases de escape de veículos [63]. Isto permite que a rede dedicada a estas extrações possa utilizar apenas um ventilador, simplificando a instalação. Adotado o mesmo caudal enquanto o restante caudal de extração, equivalente a 16660 L/s será retirado do espaço através da rede aerúlica proposta.

4.6.4 Consumo Energético

O consumo energético foi calculado com base na UTA dimensionada para a Medida de melhoria 4, onde se integraram todas as medidas propostas, variando a percentagem de ar novo em incrementos de 10%. A UTA foi associada a um sistema de produção térmica composto por um chiller e uma bomba de calor, capazes de fornecer água fria e quente às baterias de arrefecimento e aquecimento, respetivamente.

A Portaria n.º 349-B/2013 [62], estabelece os requisitos mínimos a cumprir relativos à classificação do desempenho de unidades do tipo chiller bomba de calor. Desde 31 de dezembro de 2015, a classe de eficiência mínima para estes equipamentos foi alterada de classe C para B, sendo o COP e EER para unidades com permuta exterior a ar de 3,2 e 3,1 respetivamente. Neste estudo, foi considerado um valor conservador de 3,1

para ambos os parâmetros, garantindo a conformidade com os requisitos regulamentares e uma abordagem realista para a simulação energética.

A partir destes dados, foi possível elaborar no programa HAP um modelo capaz de simular o funcionamento do chiller e da bomba de calor, por forma a realizar uma estimativa dos consumos energéticos anuais associados ao sistema de climatização.

A metodologia adotada baseou-se na simulação da variação do caudal de ar novo, assumindo um controlo dinâmico através da concentração de CO₂. O processo seguiu as seguintes etapas:

1. Dimensionamento dos ventiladores – foram selecionados ventiladores capazes de lidar com os caudais de insuflação e a extração do sistema. Para cada cenário de caudal tratado, determinou-se o ponto de funcionamento de cada ventilador e, conseqüentemente, o seu consumo instantâneo.
2. Simulação térmica – Para cada variação de caudal de ar novo, foi efetuada a simulação do desempenho do chiller e da bomba de calor, considerando a carga térmica do sistema e os coeficientes de desempenho definidos. Os resultados obtidos encontram-se apresentados na Tabela 4.18, onde são detalhados os consumos energéticos para os diferentes cenários analisados.

Tabela 4.18 - Consumo energético anual em função do caudal de ar novo para a Medida de melhoria 4.

Ar novo [L/s]	Caudal de retorno [L/s]	Caudal de extração [L/s]	Chiller [kWh]	BC [kWh]	VE [kWh]	CO ₂ [ppm]	Total [kWh]
16864,0	0,0	16864,0	54503,0	21113,0	56592,0	420,0	245392
15177,6	1686,4	15177,6	29833,0	16853,0	46877,0	426,0	206747
13491,2	3372,8	13491,2	29776,0	15423,0	38836,3	428,0	197219
11804,8	5059,2	11804,8	29898,0	14047,0	31550,0	439,0	188679
10118,4	6745,6	10118,4	30337,0	12813,0	24924,1	443,0	181258
8432,0	8432,0	8432,0	30907,0	11658,0	19170,5	451,0	174920
6745,6	10118,4	6745,6	31893,0	10607,0	14053,7	466,0	169738
5059,2	11804,8	5059,2	33277,0	9594,0	20656,1	494,0	176711
3372,8	13491,2	3372,8	35178,0	8680,0	11106,2	541,0	168148
1686,4	15177,6	1686,4	37517,0	7697,0	5116,9	692,0	163515

O ventilador de insuflação mantém-se constante ao longo da operação, uma vez que o caudal de ar também se mantém inalterado devido à imposição de 1 recirculação por hora. Neste contexto, foi selecionado o ventilador MTRL 1120 [63], cuja escolha para o

caudal correspondente, conforme representado na Figura 4.4, resulta num consumo energético anual de 56592 kWh.

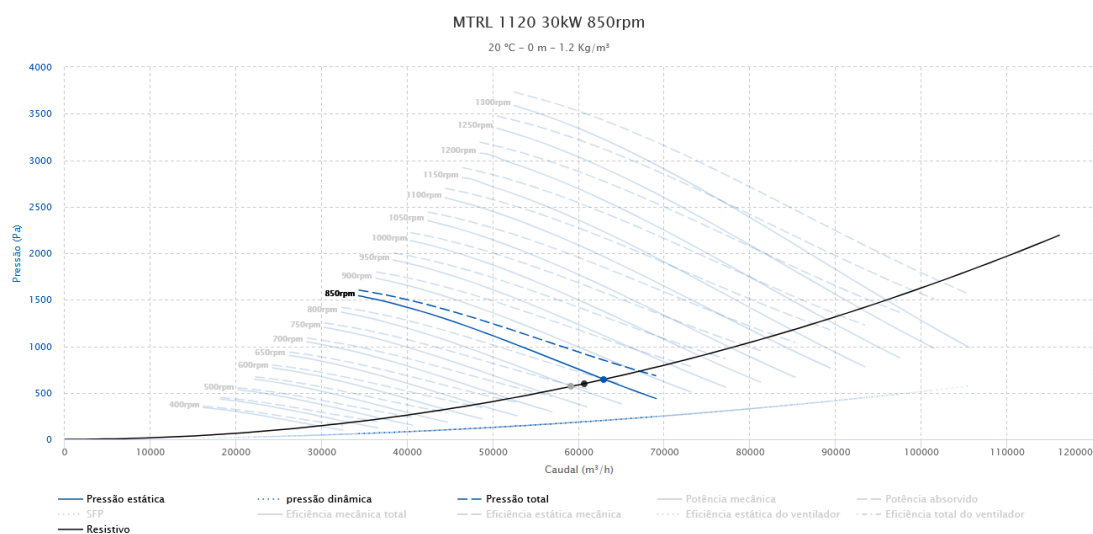


Figura 4.4 - Seleção do ventilador de insuflação [63].

A seleção dos ventiladores para os diferentes caudais seguiu a mesma metodologia. Assim para a gama de caudais compreendida entre 16864,0 L/s e 6745,6 L/s, utilizou-se o modelo MTRL 1120, enquanto para valores inferiores foi adotado o modelo MTCA [64].

A observação e análise da Tabela 4.18, evidencia que o consumo energético do chiller atinge o seu máximo quando a UTA opera com 100% de ar novo. No entanto, este consumo não diminui de forma linear com a redução do ar novo, o que seria expectável. Este comportamento resulta do fenómeno de free-cooling, em que, nos meses de inverno, em determinados períodos -, nomeadamente de janeiro a março, das 14:00h às 17:00h, a introdução de grandes volumes de ar novo a temperaturas reduzidas permite compensar integralmente a carga térmica interna do espaço, a qual se mantém constante. Deste modo, evita-se a necessidade de acionamento do chiller para redução da temperatura do ar.

Este fenómeno verifica-se para uma gama de 10% a 50% de caudal de ar novo, em que o aumento do caudal de ar novo insuflado durante os meses frios conduz a uma redução do consumo energético do chiller. A partir deste limiar, o consumo energético do chiller volta a aumentar, uma vez que, apesar da continuidade de free-cooling, o consumo adicional do chiller necessário ao tratamento do ar durante os meses quentes torna-se preponderante. Os valores detalhados dos consumos mensais do chiller e bomba de calor, em função do caudal de ar novo, podem ser consultados no Apêndice A.

Conforme esperado, verifica-se um aumento da concentração de CO₂ à medida que o caudal de ar novo diminui. No entanto, verifica-se que os valores obtidos nunca ultrapassam o limite máximo estipulado pela Portaria n.º 138-G/2021 [17], conforme indicado no capítulo 4.6.1, garantindo a QAI do espaço dentro dos limites regulamentares.

Os dados relativos ao caudal de ar e potências do chiller e bomba de calor encontra-se ilustrado na Tabela 4.19.

Tabela 4.19 – Potência de arrefecimento e aquecimento da UTA em função do caudal de ar novo.

Ar novo [L/s]	Potência arrefecimento [kW]	Potência aquecimento [kW]
16864,0	252,7	133,7
15177,6	246,1	127,6
13491,2	239,5	121,4
11804,8	233,0	115,3
10118,4	226,4	109,2
8432,0	219,9	103,1
6745,6	213,4	97,0
5059,2	206,9	90,9
3372,8	200,5	84,8
1686,4	194,1	78,6

A tendência observada nos resultados é coerente com a teoria, verificando-se uma redução das potências de arrefecimento e aquecimento com a diminuição do caudal de ar novo, visto que a carga térmica associada ao mesmo também se reduz.

Adicionalmente, adotou-se um diferencial de temperatura de 5 °C para os circuitos de água fria (7-12 °C) e água quente (40-45 °C), bem como uma perda de carga a ser vencida pelas bombas de 200 kPa e 150 kPa, respetivamente.

5 Conclusões e Desenvolvimentos Futuros

5.1 Conclusões

Esta dissertação teve como objetivo analisar o comportamento térmico de uma nave oficial da CARRIS, localizada em Miraflores. A estrutura, construída nos anos 1980, não conta com isolamento térmico, possuindo diversas aberturas para a entrada e saída de veículos. Este cenário resulta em um desajuste da climatização em relação às necessidades de conforto ao longo do ano. Além disso, a nave carece de qualquer tipo de sistema de ventilação adequado, o que compromete a eficiência na exaustão dos gases de escape.

As análises efetuadas ao edifício recorreram ao programa HAP, desenvolvido pela Carrier. Este programa permitiu a modelação de todos os elementos da envolvente do edifício, incluindo a cobertura, vãos envidraçados, pavimento, portões de acesso e paredes exteriores. Os dados foram introduzidos no programa por forma a simular o comportamento térmico do edifício no seu estado atual e avaliar o impacto térmico de cada componente. Com base nessas simulações, foi possível propor melhorias no desempenho térmico da edificação. Os estudos realizados consideraram a espessura e condutibilidade térmica de cada material, bem como a orientação do edifício.

O modelo desenvolvido para o caso base identificou as principais falhas na envolvente do edifício, destacando-se a cobertura como o elemento com maior impacto nas cargas térmicas internas. A contribuição da cobertura para o calor sensível foi de 88%. Os ganhos solares e por transmissão das janelas representam 5% do calor sensível total, seguidos pelas paredes, que representam 2%. Em particular, a fachada sul foi responsável por 69% dos ganhos térmicos totais da fachada durante a estação de arrefecimento, e 62% durante a estação de aquecimento.

Com base nestes dados, foi desenvolvida a Medida de melhoria 1, que consistiu na aplicação de isolamento térmico na cobertura do edifício. Para este efeito, o material isolante selecionado foi o EPS (Poliestireno Expandido), devido ao seu excelente desempenho em termos de PORE (Potencial de Redução de Energia). Foram simuladas diferentes espessuras de EPS (30, 40, 60 e 80 mm). A análise inicial revelou que a aplicação de uma espessura de 30 mm resultou em uma redução de 69% no calor sensível total durante o modo de arrefecimento e 72% no modo de aquecimento, correspondendo a uma redução de 549,5 kW e 406,5 kW, respetivamente. A análise da variação de espessura do isolamento demonstrou que o aumento de 40 mm para 60 mm de EPS proporcionou a maior melhoria percentual, excluindo o caso da espessura de 30 mm, apresentando uma melhoria de 16%. Este valor sugere que a espessura de 60 mm pode representar o PORE para este tipo de aplicação.

A Medida de melhoria 2 focou a implementação do sistema de isolamento ETICS na fachada sul. Novamente, o EPS foi utilizado nas espessuras de 30, 40, 60 e 80 mm. A aplicação do sistema com uma espessura de 30 mm resultou em uma redução na potência de arrefecimento e aquecimento associada ao calor permutado pelas paredes exteriores de 8,3 kW e 16,7 kW, respetivamente. A contribuição no calor sensível total da fachada sul foi de 0,5% no modo de arrefecimento e 1,6% no modo de aquecimento. Esta medida permitiu melhorar a potência sensível associada ao grupo das paredes exteriores em 31% e 34% para o modo de arrefecimento e aquecimento, respetivamente. À exceção da melhoria que se verifica ao implementar uma espessura de 30 mm, a maior melhoria ocorre ao aumentar a espessura de 40 para 60 mm, atingindo uma redução de 8% para o modo de aquecimento.

A Medida de melhoria 3 consistiu na melhoria dos vãos envidraçados e os portões de acesso, otimizando o seu coeficiente global de transmissão de calor para 3,3 e 4,50 W/m².K, respetivamente. A alteração dos vãos envidraçados resultou numa redução na potência de arrefecimento e aquecimento de 3189 W e 7133 W, respetivamente, devido à diminuição dos ganhos térmicos por transmissão. Quanto aos ganhos térmicos devido à radiação solar, verificou-se uma redução de 3,2 kW. A melhoria efetuada nos portões de acesso, localizados nas fachadas a Este e Oeste, resultou em uma redução na potência em modo de arrefecimento e aquecimento de 3274 W e 7324 W, respetivamente. Essas alterações representaram uma contribuição de 4,9% para a redução do calor sensível total do espaço no modo de arrefecimento e 3,6% no modo de aquecimento.

A Medida de melhoria 4 envolveu a aplicação conjunta de todas as medidas propostas, resultando na maior redução das potências térmicas envolvidas. A melhoria obtida foi

de 84% no modo de arrefecimento e 83% no modo de aquecimento, correspondendo a uma redução de 666,1 kW e 471,5 kW, respetivamente. A contribuição relativa das diferentes melhorias foi a seguinte: a cobertura, os vãos envidraçados e portões, e o sistema ETICS na fachada sul contribuíram com 38%, 28% e 2% para o modo de arrefecimento e 53%, 21% e 6% para o modo de aquecimento. A implementação de todas as medidas simultaneamente faz com que o seu impacto no calor total sensível seja diferente quando comparado com a sua implementação por si só. Embora o impacto do conjunto de medidas tenha sido mais expressivo em relação à implementação individual de cada uma, a redução mais significativa no modo de arrefecimento ocorreu com a Medida de melhoria 1 (aplicação de isolamento na cobertura), com uma melhoria de 33,9 kW, representando 38% do calor sensível total no modo de arrefecimento e 53% no modo de aquecimento, o que resultou em uma redução de 8,3 p.p. e 10,9 p.p. respetivamente.

A Medida de melhoria 3 (melhoria dos vãos envidraçados e portões) foi a que apresentou as maiores alterações no calor sensível total, verificando-se um aumento em modo de arrefecimento de 23,1 p.p. e 17,4 p.p. para o aquecimento, embora as reduções em termos de potência tenham permanecido semelhantes.

A Medida de melhoria 2 (sistema ETICS) não apresentou variações significativas, permanecendo com um impacto marginal sobre o desempenho térmico global do edifício. Com isso, pode-se concluir que a primeira e a terceira medidas têm maior impacto no desempenho térmico do edifício, quando aplicadas simultaneamente.

A análise ao consumo energético da instalação, em função do caudal de ar novo, revelou que o consumo do chiller não apresenta um comportamento linear, diminuindo o consumo em alguns casos com o aumento do caudal de ar novo devido ao fenómeno free-cooling, que ocorre em alguns meses mais frios. Esta análise sugere que o caso que apresenta o maior PORE em termos de consumo do chiller ocorre quando o caudal de ar novo atinge aproximadamente 80%.

Foi adotado um sistema de controlo dinâmico da ventilação baseado na concentração de CO₂ do espaço, com o objetivo de proporcionar uma gestão energética mais eficiente sem comprometer a QAI. Neste sentido, existiu a necessidade de definir um caudal de ar novo mínimo adequado para diluir as concentrações excessivas de CO₂ e outros poluentes. Este caudal foi determinado com base na Portaria n.º 353-A/2013 [59], utilizando o método prescritivo, e na norma EN 15251:2008 [60], tendo sido estimado em 11333 L/s, assegurando um ambiente seguro e confortável para os trabalhadores.

Quanto ao caudal de insuflação, este foi definido com base na imposição de 1 recirculação por hora, equivalente a 16864 L/s. Foram selecionados os ventiladores capazes de lidar com os caudais de insuflação e extração, fazendo uma seleção para cada ponto de funcionamento, variando o caudal de ar novo em incrementos de 10% e analisando o respetivo consumo instantâneo. Estes consumos foram posteriormente utilizados para determinar o consumo energético anual associado à ventilação.

Foi possível concluir que, mesmo utilizando apenas 10% de ar novo (1686,4 L/s), a concentração de CO₂ não ultrapassa o limar de proteção definido pela Portaria n.º 138-G/2021 [17], atingindo o valor máximo de 692 ppm.

Contemplando todos os consumos associados (chiller, BC e ventiladores) o regime de funcionamento com 10% de ar novo é o que apresenta o menor consumo anual, equivalente a 163515 kWh, uma vez que apesar do free-cooling observado, o consumo anual do ventilador de extração é preponderante, atingindo os 56592 kWh para o caso com 100% de ar novo e 5116,9 kWh para 10% de ar novo.

No entanto, o consumo total acaba por ser menor para a situação que apresenta 10% de caudal de ar novo, devido ao consumo do ventilador de extração.

5.2 Desenvolvimentos Futuros

O presente trabalho centrou-se na caracterização e parametrização dos diversos elementos constituintes da envolvente do edifício, com o objetivo de realizar um estudo térmico detalhado e avaliar o impacto de diferentes soluções de melhoria no desempenho energético.

Os resultados obtidos sugerem que seria benéfico a realização de estudos adicionais aos vãos envidraçados especialmente no que se refere à implementação de sistemas de sombreamento e à utilização de vidros de alto desempenho, capazes de minimizar os ganhos térmicos por radiação solar sem comprometer a iluminação natural.

Além disso, considerando a magnitude das potências térmicas requeridas pelos sistemas de AVAC dimensionados, recomenda-se a avaliação da viabilidade da instalação de painéis fotovoltaicos na cobertura. Devido à sua extensa área disponível e à orientação favorável a sul, esta solução poderia contribuir significativamente para a redução do consumo energético, possibilitando a compensação parcial ou total das necessidades energéticas dos equipamentos.

Outro aspeto que poderia ser aprofundado é a otimização do consumo energético dos ventiladores. No presente estudo, a análise foi realizada com base em equipamentos

comerciais de referência facilmente encontrados na literatura técnica e em catálogos online. No entanto, uma seleção mais criteriosa, realizada em colaboração com fornecedores e considerando especificações mais detalhadas para o caso em estudo, poderá proporcionar soluções mais eficientes e economicamente vantajosas.

Por fim, este estudo energético poderia ser complementado com uma análise económica avaliando os investimentos necessários para a implementação das diferentes soluções propostas, bem como os respetivos períodos de retorno. A realização de um estudo de viabilidade económica permitiria quantificar os benefícios financeiros das medidas de eficiência energética e auxiliar na tomada de decisões para eventuais intervenções futuras no edifício.

Referências

- [1] Jornal Oficial da União Europeia, «ACORDO DE PARIS», 2016.
- [2] «Portugal Energia». Acedido: 24 de Outubro de 2023. [Online]. Disponível em: <https://www.portugalenergia.pt/setor-energetico/bloco-3/>
- [3] Direção Geral de Energia e Geologia, «Balanço Energético Sintético 2022», 2022. [Online]. Disponível em: www.dgeg.gov.pt
- [4] Agência Portuguesa do Ambiente, «Plano Nacional de Energia e Clima (PNEC)». Acedido: 24 de Outubro de 2023. [Online]. Disponível em: <https://apambiente.pt/clima/plano-nacional-de-energia-e-clima-pnec>
- [5] APA, «5TH BIENNIAL REPORT in the context of the Kyoto Protocol», 2022.
- [6] «Conferência das Nações Unidas sobre o Clima», 1979.
- [7] «What is the United Nations Framework Convention on Climate Change? | UNFCCC». Acedido: 25 de Outubro de 2023. [Online]. Disponível em: <https://unfccc.int/process-and-meetings/what-is-the-united-nations-framework-convention-on-climate-change>
- [8] «RNC2050 - Roteiro para a Neutralidade Carbónica». Acedido: 13 de Dezembro de 2023. [Online]. Disponível em: <https://descarbonizar2050.apambiente.pt/>
- [9] «Edifícios». Acedido: 6 de Fevereiro de 2024. [Online]. Disponível em: <https://www.dgeg.gov.pt/pt/areas-setoriais/energia/eficiencia-energetica/edificios/>
- [10] «Pobreza Energética em Portugal | edp.com». Acedido: 6 de Fevereiro de 2024. [Online]. Disponível em: <https://www.edp.com/pt-pt/historias-edp/pobreza-energetica-em-portugal>
- [11] Concelho Empresarial para o Desenvolvimento Sustentável, «Manual de boas práticas de eficiência energética – Implementar o desenvolvimento sustentável nas empresas», 2005.
- [12] V. Bianco, F. Scarpa, e L. A. Tagliafico, «Estimation of primary energy savings by using heat pumps for heating purposes in the residential sector», *Appl Therm Eng*, vol. 114, pp. 938–947, 2017, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2016.12.058.
- [13] D. I. Kolaitis, E. Malliotakis, D. A. Kontogeorgos, I. Mandilaras, D. I. Katsourinis, e M. A. Founti, «Comparative assessment of internal and external thermal insulation systems for energy efficient retrofitting of

- residential buildings», *Energy Build*, vol. 64, pp. 123–131, 2013, doi: 10.1016/j.enbuild.2013.04.004.
- [14] SCE, «16 anos de Certificação Energética dos Edifícios», 2023. Acedido: 13 de Novembro de 2023. [Online]. Disponível em: <https://www.sce.pt/16-anos-de-certificacao-energetica-dos-edificios/>
- [15] Direção Geral de Energia e Geologia, «Edifícios». Acedido: 13 de Novembro de 2023. [Online]. Disponível em: <https://www.adene.pt/edificios/>
- [16] «Decreto-Lei n.º 101-D/2020», 2020.
- [17] «Portaria n.º 138-G/2021», 2021.
- [18] «Portaria n.º 138-I/2021», 2021.
- [19] Direção Geral de Energia e Geologia, «Manual SCE», 2021.
- [20] P. Patel, «Energy Saving by Modification in HVAC as a Cost Saving Opportunity for Industries», *Int J Pharm Sci Res*, vol. 4, n. 9, p. 3347, 2013, doi: 10.13040/IJPSR.0975-8232.4(9).3347-56.
- [21] E. Stamponi, N. Lattanzi, e E. Moretti, «Experimental and numerical assessment for HVAC management in an industrial building: A preliminary optimization», em *Journal of Physics: Conference Series*, Institute of Physics, Dez. 2021. doi: 10.1088/1742-6596/2069/1/012111.
- [22] R. Comini *et al.*, «Eficiência energética nos edifícios residenciais Manual do Consumidor», 2008.
- [23] «Isolamento Térmico: prós e contras de 10 materiais». Acedido: 23 de Janeiro de 2024. [Online]. Disponível em: <https://www.deco.proteste.pt/casa-energia/aquecimento/dicas/isolamento-termico-pros-contras-10-materiais>
- [24] C. Santos e L. Matias, «Laboratório Nacional de Engenharia Civil - Coeficientes de transmissão térmica de elementos da envolvente dos edifícios», 2006.
- [25] A. M. Raimundo, N. B. Saraiva, e A. V. M. Oliveira, «Thermal insulation cost optimality of opaque constructive solutions of buildings under Portuguese temperate climate», *Build Environ*, vol. 182, Set. 2020, doi: 10.1016/j.buildenv.2020.107107.
- [26] A. Brandão de Vasconcelos, M. D. Pinheiro, A. Manso, e A. Cabaço, «EPBD cost-optimal methodology: Application to the thermal rehabilitation of the building envelope of a Portuguese residential reference building», *Energy Build*, vol. 111, pp. 12–25, Jan. 2016, doi: 10.1016/j.enbuild.2015.11.006.

- [27] L. Guardigli, M. A. Bragadin, F. Della Fornace, C. Mazzoli, e D. Prati, «Energy retrofit alternatives and cost-optimal analysis for large public housing stocks», *Energy Build*, vol. 166, pp. 48–59, Mai. 2018, doi: 10.1016/j.enbuild.2018.02.003.
- [28] LNEC, «Regras para a Concessão de uma Aprovação Técnica Europeia (ETA) ou de um Documento de Homologação (DH) a Sistemas Compósitos de Isolamento Térmico pelo Exterior (ETICS)», 2010.
- [29] Isotherm, «CAPOTO - ISOTHERM». Acedido: 24 de Novembro de 2023. [Online]. Disponível em: <https://isotherm.pt/capoto/>
- [30] Deco Proteste, «Isolamento Térmico: prós e contras de 10 materiais». Acedido: 23 de Janeiro de 2024. [Online]. Disponível em: <https://www.deco.proteste.pt/casa-energia/aquecimento/dicas/isolamento-termico-pros-contras-10-materiais>
- [31] M. Ferreira, M. Almeida, A. Rodrigues, e S. M. Silva, «Comparing cost-optimal and net-zero energy targets in building retrofit», *Building Research and Information*, vol. 44, n. 2, pp. 188–201, Fev. 2016, doi: 10.1080/09613218.2014.975412.
- [32] R. Miguel Santos Baiona, J. António Antunes Hormigo, e P. Miguel Matos Soares, «NZEB-Um Desafio para a Engenharia Civil», 2014.
- [33] C. Rodrigues e F. Freire, «Building retrofit addressing occupancy: An integrated cost and environmental life-cycle analysis», *Energy Build*, vol. 140, pp. 388–398, Abr. 2017, doi: 10.1016/j.enbuild.2017.01.084.
- [34] Adene, «Isolamento de Coberturas», 2016.
- [35] S. B. Sadineni, S. Madala, e R. F. Boehm, «Passive building energy savings: A review of building envelope components», 2011, *Elsevier Ltd*. doi: 10.1016/j.rser.2011.07.014.
- [36] H. Akbari e M. J. ASHRAE Steven Konopacki, «The Impact of Reflectivity and Emissivity of Roofs on Building Cooling and Heating Energy Use».
- [37] A. Synnefa, M. Santamouris, e H. Akbari, «Estimating the effect of using cool coatings on energy loads and thermal comfort in residential buildings in various climatic conditions», *Energy Build*, vol. 39, n. 11, pp. 1167–1174, Nov. 2007, doi: 10.1016/j.enbuild.2007.01.004.
- [38] M. Arici, H. Karabay, e M. Kan, «Flow and heat transfer in double, triple and quadruple pane windows», *Energy Build*, vol. 86, pp. 394–402, 2015, doi: 10.1016/j.enbuild.2014.10.043.

- [39] A. M. Raimundo, N. B. Saraiva, L. Dias Pereira, e A. C. Rebelo, «Market-oriented cost-effectiveness and energy analysis of windows in Portugal», *Energies (Basel)*, vol. 14, n. 13, Jul. 2021, doi: 10.3390/en14133720.
- [40] M. Pinto, J. Viegas, e V. P. de Freitas, «Air permeability measurements of dwellings and building components in Portugal», *Build Environ*, vol. 46, n. 12, pp. 2480–2489, Dez. 2011, doi: 10.1016/j.buildenv.2011.06.009.
- [41] T. Kalamees, «Air tightness and air leakages of new lightweight single-family detached houses in Estonia», *Build Environ*, vol. 42, n. 6, pp. 2369–2377, Jun. 2007, doi: 10.1016/j.buildenv.2006.06.001.
- [42] E. Cuce, «Role of airtightness in energy loss from windows: Experimental results from in-situ tests», *Energy Build*, vol. 139, pp. 449–455, Mar. 2017, doi: 10.1016/j.enbuild.2017.01.027.
- [43] J. Šadauskiene, L. Šeduikyte, V. Paukštys, K. Banionis, e A. Gailius, «The role of air tightness in assessment of building energy performance: Case study of Lithuania», *Energy for Sustainable Development*, vol. 32, pp. 31–39, 2016, doi: 10.1016/j.esd.2016.02.006.
- [44] S. Somasundaram, A. Chong, Z. Wei, e S. R. Thangavelu, «Energy saving potential of low-e coating based retrofit double glazing for tropical climate», *Energy Build*, vol. 206, Jan. 2020, doi: 10.1016/j.enbuild.2019.109570.
- [45] M. González-Torres, L. Pérez-Lombard, J. F. Coronel, I. R. Maestre, e D. Yan, «A review on buildings energy information: Trends, end-uses, fuels and drivers», 1 de Novembro de 2022, *Elsevier Ltd.* doi: 10.1016/j.egy.2021.11.280.
- [46] European Heat Pump Association, «European heat pump market and statistics report 2023 - European Heat Pump Association». Acedido: 3 de Fevereiro de 2024. [Online]. Disponível em: <https://www.ehpa.org/news-and-resources/publications/european-heat-pump-market-and-statistics-report-2023/>
- [47] European Heat Pump Association, «Heat pumps: Europe’s buildings avoid more emissions than ever - European Heat Pump Association». Acedido: 3 de Fevereiro de 2024. [Online]. Disponível em: <https://www.ehpa.org/news-and-resources/press-releases/market-report-2023/>
- [48] R. M. Lazzarin, «Heat Recover», 1995.
- [49] G. Kosmadakis, «Estimating the potential of industrial (high-temperature) heat pumps for exploiting waste heat in EU industries», *Appl Therm Eng*,

- vol. 156, pp. 287–298, Jun. 2019, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2019.04.082.
- [50] N. Aste, R. S. Adhikari, e M. Manfren, «Cost optimal analysis of heat pump technology adoption in residential reference buildings», *Renew Energy*, vol. 60, pp. 615–624, Dez. 2013, doi: 10.1016/j.renene.2013.06.013.
- [51] U.S. Department of Energy, «EnergyPlus Essentials», 2021.
- [52] DesignBuilder Software Ltd, «DesignBuilder 2.1 User’s Manual», 2009.
- [53] Carrier, «Hourly Analysis Program».
- [54] ASHRAE, «ASHRAE Standard 90.1-2010», 2010.
- [55] CIN - Corporação Industrial do Norte, «Sistema CIN-k Manual de Utilização», 2019.
- [56] Carris, «Autocarros Standard». Acedido: 13 de Novembro de 2024. [Online]. Disponível em: <https://www.carris.pt/descubra/frota/autocarros-standard/>
- [57] MAN, «Engines and Components, Catálogo Geral».
- [58] H. C. Frey, N. M. Roupail, H. Zhai, T. L. Farias, e G. A. Gonçalves, «Comparing real-world fuel consumption for diesel- and hydrogen-fueled transit buses and implication for emissions», *Transp Res D Transp Environ*, vol. 12, n. 4, pp. 281–291, 2007, doi: 10.1016/j.trd.2007.03.003.
- [59] «Portaria n.º 353-A/2013», 2013.
- [60] «EN 15251:2008 - Indoor Environmental Input Parameters for Design and Assessment of Energy Performance of Buildings-Addressing Indoor Air Quality, Thermal Environment, Lighting and Acoustics», 2006.
- [61] «EN 15251:2008», 2008.
- [62] «Portaria n.º 349-B/2013», 2013.
- [63] «Fanware | MTRL 1120». Acedido: 4 de Fevereiro de 2025. [Online]. Disponível em: <https://www.casals.com/pt/fanware/50/fans/357-mtrl-1120?freq=50&flow=60715&pressure=50.9858&temperature=20&height=0&variant=356>
- [64] «Fanware | MTCA 560 (std)». Acedido: 4 de Fevereiro de 2025. [Online]. Disponível em: <https://www.casals.com/pt/fanware/50/fans/562-mtca-560?freq=50&flow=6072&pressure=61.183&temperature=20&height=0&variant=561>

Apêndices

Apêndice A - Consumo Mensal do Chiller e da Bomba de Calor

Chiller

100% Ar Novo

	Consumo Chiller [kWh]	Consumo bombas circuladoras [kWh]
Janeiro	0	0
Fevereiro	0	0
Março	376	73
Abril	877	209
Mai	2674	376
Junho	4998	675
Julho	11605	975
Agosto	11092	868
Setembro	11258	932
Outubro	4475	611
Novembro	1437	218
Dezembro	663	111
Total	49455	5048

90% Ar Novo

	Consumo Chiller [kWh]	Consumo bombas circuladoras [kWh]
Janeiro	0	0
Fevereiro	0	0
Março	27	29
Abril	175	133
Mai	286	182
Junho	2720	597
Julho	7659	915
Agosto	7521	791
Setembro	6435	816
Outubro	930	385
Novembro	66	66
Dezembro	58	41
Total	25877	3956

80% Ar Novo

	Consumo Chiller [kWh]	Consumo bombas circuladoras [kWh]
Janeiro	0	0
Fevereiro	0	0
Março	31	32
Abril	192	140
Maiο	313	197
Junho	2787	610
Julho	7572	915
Agosto	7358	782
Setembro	6377	810
Outubro	990	401
Novembro	79	76
Dezembro	69	44
Total	25769	4007

70% Ar Novo

	Consumo Chiller [kWh]	Consumo bombas circuladoras [kWh]
Janeiro	0	0
Fevereiro	3	8
Março	49	58
Abril	215	159
Maiο	348	213
Junho	2862	613
Julho	7509	912
Agosto	7231	784
Setembro	6317	819
Outubro	1063	423
Novembro	100	97
Dezembro	71	43
Total	25768	4130

60% Ar Novo

	Consumo Chiller [kWh]	Consumo bombas circuladoras [kWh]
Janeiro	4	8
Fevereiro	11	23
Março	68	75
Abril	244	176
Mai	413	278
Junho	2967	630
Julho	7473	916
Agosto	7101	780
Setembro	6316	833
Outubro	1174	492
Novembro	129	120
Dezembro	67	38
Total	25969	4368

50% Ar Novo

	Consumo Chiller [kWh]	Consumo bombas circuladoras [kWh]
Janeiro	8	11
Fevereiro	27	43
Março	97	101
Abril	299	225
Mai	486	297
Junho	3086	638
Julho	7462	906
Agosto	6995	779
Setembro	6326	841
Outubro	1295	526
Novembro	177	163
Dezembro	78	40
Total	26337	4570

40% Ar Novo

	Consumo Chiller [kWh]	Consumo bombas circuladoras [kWh]
Janeiro	13	14
Fevereiro	65	84
Março	160	143
Abril	403	322
Maiο	606	364
Junho	3252	665
Julho	7449	885
Agosto	6903	766
Setembro	6351	836
Outubro	1452	567
Novembro	257	227
Dezembro	75	35
Total	26986	4907

30% Ar Novo

	Consumo Chiller [kWh]	Consumo bombas circuladoras [kWh]
Janeiro	20	17
Fevereiro	119	118
Março	305	287
Abril	538	368
Maiο	792	465
Junho	3456	688
Julho	7441	853
Agosto	6812	742
Setembro	6388	816
Outubro	1663	621
Novembro	373	277
Dezembro	84	37
Total	27989	5288

20% Ar Novo

	Consumo Chiller [kWh]	Consumo bombas circuladoras [kWh]
Janeiro	49	45
Fevereiro	186	130
Março	496	361
Abril	741	451
Mai	1095	617
Junho	3714	698
Julho	7420	822
Agosto	6721	715
Setembro	6424	786
Outubro	1975	731
Novembro	518	312
Dezembro	103	68
Total	29442	5736

10% Ar Novo

	Consumo Chiller [kWh]	Consumo bombas circuladoras [kWh]
Janeiro	85	56
Fevereiro	307	184
Março	738	384
Abril	1057	516
Mai	1565	684
Junho	3995	687
Julho	7364	791
Agosto	6633	687
Setembro	6463	756
Outubro	2426	791
Novembro	755	378
Dezembro	139	75
Total	31527	5990

Bomba de Calor

100% Ar Novo

	Consumo BC [kWh]	Consumo bombas circuladoras [kWh]
Janeiro	4523	486
Fevereiro	2954	374
Março	1647	252
Abril	1504	277
Maio	1697	292
Junho	1199	211
Julho	1313	351
Agosto	1140	349
Setembro	1690	330
Outubro	2388	362
Novembro	2403	338
Dezembro	4440	440
Total	26897	4062

90% Ar Novo

	Consumo BC [kWh]	Consumo bombas circuladoras [kWh]
Janeiro	4266	448
Fevereiro	2762	351
Março	1319	223
Abril	872	215
Maio	185	134
Junho	16	16
Julho	0	0
Agosto	0	0
Setembro	0	0
Outubro	150	102
Novembro	1318	247
Dezembro	3832	399
Total	14719	2134

80% Ar Novo

	Consumo BC [kWh]	Consumo bombas circuladoras [kWh]
Janeiro	3999	413
Fevereiro	2558	324
Março	1201	195
Abril	749	187
Maiο	111	90
Junho	8	11
Julho	0	0
Agosto	0	0
Setembro	0	0
Outubro	90	73
Novembro	1204	226
Dezembro	3617	367
Total	13537	1886

70% Ar Novo

	Consumo BC [kWh]	Consumo bombas circuladoras [kWh]
Janeiro	3733	387
Fevereiro	2372	283
Março	1107	173
Abril	632	145
Maiο	58	49
Junho	2	5
Julho	0	0
Agosto	0	0
Setembro	0	0
Outubro	45	45
Novembro	1090	187
Dezembro	3391	341
Total	12431	1616

60% Ar Novo

	Consumo BC [kWh]	Consumo bombas circuladoras [kWh]
Janeiro	3478	355
Fevereiro	2185	254
Março	1009	150
Abril	542	120
Mai	26	21
Junho	0	0
Julho	0	0
Agosto	0	0
Setembro	0	0
Outubro	16	21
Novembro	994	155
Dezembro	3175	312
Total	11425	1388

50% Ar Novo

	Consumo BC [kWh]	Consumo bombas circuladoras [kWh]
Janeiro	3207	321
Fevereiro	1996	227
Março	916	129
Abril	462	95
Mai	9	11
Junho	0	0
Julho	0	0
Agosto	0	0
Setembro	0	0
Outubro	3	5
Novembro	911	120
Dezembro	2958	289
Total	10461	1197

40% Ar Novo

	Consumo BC [kWh]	Consumo bombas circuladoras [kWh]
Janeiro	2943	291
Fevereiro	1814	199
Março	835	113
Abril	390	76
Maio	2	3
Junho	0	0
Julho	0	0
Agosto	0	0
Setembro	0	0
Outubro	0	0
Novembro	833	107
Dezembro	2747	255
Total	9564	1043

30% Ar Novo

	Consumo BC [kWh]	Consumo bombas circuladoras [kWh]
Janeiro	2691	256
Fevereiro	1633	175
Março	748	98
Abril	329	56
Maio	0	0
Junho	0	0
Julho	0	0
Agosto	0	0
Setembro	0	0
Outubro	0	0
Novembro	760	92
Dezembro	2527	228
Total	8688	906

20% Ar Novo

	Consumo BC [kWh]	Consumo bombas circuladoras [kWh]
Janeiro	2439	234
Fevereiro	1468	152
Março	671	85
Abril	280	50
Maio	0	0
Junho	0	0
Julho	0	0
Agosto	0	0
Setembro	0	0
Outubro	0	0
Novembro	690	85
Dezembro	2326	201
Total	7873	807

10% Ar Novo

	Consumo BC [kWh]	Consumo bombas circuladoras [kWh]
Janeiro	2172	200
Fevereiro	1285	131
Março	595	72
Abril	235	41
Maio	0	0
Junho	0	0
Julho	0	0
Agosto	0	0
Setembro	0	0
Outubro	0	0
Novembro	610	74
Dezembro	2104	178
Total	7001	696

Apêndice B - Constituição das Paredes Exteriores

Pano de alvenaria sul						
Elemento de Camada	e (m)	λ (W/m.K)	R (m ² .K/W)	U (W/m ² .K)	mti (kg/m ³)	mt (kg/m ²)
Resistência Interior	-	-	0,1300	1,112	-	240
Reboco Tradicional	0,010	1,30	0,0077		1900	
Tijolo cerâmico	0,250	0,35	0,7143		808	
Reboco Tradicional	0,010	1,30	0,0077		1900	
Resistência Exterior	-	-	0,0400		-	
Espessura Total	0,270	m				

Pano de alvenaria este e norte						
Elemento de Camada	e (m)	λ (W/m.K)	R (m ² .K/W)	U (W/m ² .K)	mti (kg/m ³)	mt (kg/m ²)
Resistência Interior	-	-	0,1300	0,959	-	280
Reboco Tradicional	0,010	1,30	0,0077		1900	
Tijolo cerâmico	0,300	0,35	0,8571		808	
Reboco Tradicional	0,010	1,30	0,0077		1900	
Resistência Exterior	-	-	0,0400		-	
Espessura Total	0,320	m				

Pano de alvenaria oeste						
Elemento de Camada	e (m)	λ (W/m.K)	R (m ² .K/W)	U (W/m ² .K)	mti (kg/m ³)	mt (kg/m ²)
Resistência Interior	-	-	0,1300	1,045	-	256
Reboco Tradicional	0,010	1,30	0,0077		1900	
Tijolo cerâmico	0,270	0,35	0,7714		808	
Reboco Tradicional	0,010	1,30	0,0077		1900	
Resistência Exterior	-	-	0,0400		-	
Espessura Total	0,290	m				

Apêndice C – Ganhos Térmicos em Função da Espessura de Isolamento da Cobertura

Espessura de 30 mm

CARGAS DO ESPAÇO	ARREFECIMENTO			AQUECIMENTO		
	ARREFECIMENTO (Ago 1600)			AQUECIMENTO (Mês projeto)		
	ODA BS / BH 32,9 °C / 20,8 °C			ODA BS / BH 4,3 °C / 3,9 °C		
		Sensível	Latente		Sensível	Latente
	Detalhes	[W]	[W]	Detalhes	[W]	[W]
Ganhos solares de Janelas	157 m ²	34840	-	157 m ²	-	-
Paredes	1494 m ²	10223	-	1494 m ²	25398	-
Transmissão pela cobertura	5724 m ²	149337	-	5724 m ²	90747	-
Transmissão pelas janelas	157 m ²	6494	-	157 m ²	15264	-
Transmissão pelas clarabóias	0 m ²	0	-	0 m ²	0	-
Transmissão por portas	167 m ²	8124	-	167 m ²	19096	-
Transmissão pelo pavimento	4124 m ²	0	-	4124 m ²	8960	-
Iluminação	47002 W	33846	-	0	0	-
Pessoas	35	1969	4666	0	0	0
Carga total	-	244833	4666	-	159466	0

Espessura de 40 mm

	ARREFECIMENTO			AQUECIMENTO		
	ARREFECIMENTO (Ago 1600)			AQUECIMENTO (Mês projeto)		
	ODA BS / BH 32,9 °C / 20,8 °C			ODA BS / BH 4,3 °C / 3,9 °C		
		Sensível	Latente		Sensível	Latente
CARGAS DO ESPAÇO	Detalhes	[W]	[W]	Detalhes	[W]	[W]
Ganhos solares de Janelas	157 m ²	34840	-	157 m ²	-	-
Paredes	1494 m ²	10223	-	1494 m ²	25398	-
Transmissão pela cobertura	5724 m ²	117423	-	5724 m ²	71287	-
Transmissão pelas janelas	157 m ²	6494	-	157 m ²	15264	-
Transmissão pelas clarabóias	0 m ²	0	-	0 m ²	0	-
Transmissão por portas	167 m ²	8124	-	167 m ²	19096	-
Transmissão pelo pavimento	4124 m ²	0	-	4124 m ²	8960	-
Iluminação	47002 W	33846	-	0	0	-
Pessoas	35	1969	4666	0	0	0
Carga total	-	212920	4666	-	140006	0

Espessura de 60 mm

	ARREFECIMENTO			AQUECIMENTO		
	ARREFECIMENTO (Ago 1600)			AQUECIMENTO (Mês projeto)		
	ODA BS / BH 32,9 °C / 20,8 °C			ODA BS / BH 4,3 °C / 3,9 °C		
		Sensível	Latente		Sensível	Latente
CARGAS DO ESPAÇO	Detalhes	[W]	[W]	Detalhes	[W]	[W]
Ganhos solares de Janelas	157 m ²	34840	-	157 m ²	-	-
Paredes	1494 m ²	10223	-	1494 m ²	25398	-
Transmissão pela cobertura	5724 m ²	82369	-	5724 m ²	49890	-
Transmissão pelas janelas	157 m ²	6494	-	157 m ²	15264	-
Transmissão por portas	167 m ²	8124	-	167 m ²	19096	-
Transmissão pelo pavimento	4124 m ²	0	-	4124 m ²	8960	-
Iluminação	47002 W	33846	-	0	0	-
Pessoas	35	1969	4666	0	0	0
Carga total	-	177866	4666	-	118608	0

Espessura de 80 mm

CARGAS DO ESPAÇO	ARREFECIMENTO			AQUECIMENTO		
	ARREFECIMENTO (Ago 1600)			AQUECIMENTO (Mês projeto)		
	ODA BS / BH 32,9 °C / 20,8 °C			ODA BS / BH 4,3 °C / 3,9 °C		
		Sensível	Latente		Sensível	Latente
	Detalhes	[W]	[W]	Detalhes	[W]	[W]
Ganhos solares de Janelas	157 m ²	34840	-	157 m ²	-	-
Paredes	1494 m ²	10223	-	1494 m ²	25398	-
Transmissão pela cobertura	5724 m ²	63544	-	5724 m ²	38372	-
Transmissão pelas janelas	157 m ²	6494	-	157 m ²	15264	-
Transmissão por portas	167 m ²	8124	-	167 m ²	19096	-
Transmissão pelo pavimento	4124 m ²	0	-	4124 m ²	8960	-
Iluminação	47002 W	33846	-	0	0	-
Pessoas	35	1969	4666	0	0	0
Carga total	-	159040	4666	-	107091	0

Anexos

Anexo A – Dimensionamento da UTA para a 1ª e 4ª Medida

Medida de melhoria 1

Air System Information

Air System Name UTA
 Equipment Class CW AHU
 Air System Type SZCAV

Number of zones 1
 Floor Area 6528,0 m²
 Location Lisbon, Portugal

Sizing Calculation Information

Calculation Months Jan to Dec
 Sizing Data Calculated

Zone L/s Sizing Sum of space airflow rates
 Space L/s Sizing Individual peak space loads

Central Cooling Coil Sizing Data

Total coil load 296,7 kW
 Sensible coil load 249,8 kW
 Coil L/s at Aug 1500 16864 L/s
 Max block L/s 16864 L/s
 Sum of peak zone L/s 16864 L/s
 Sensible heat ratio 0,842
 m²/kW 22,0
 W/m² 45,4
 Water flow @ 5,0 °K rise 14,20 L/s

Load occurs at Aug 1500
 OA DB / WB 32,6 / 20,7 °C
 Entering DB / WB 26,2 / 18,4 °C
 Leaving DB / WB 13,8 / 13,1 °C
 Coil ADP 12,4 °C
 Bypass Factor 0,100
 Resulting RH 48 %
 Design supply temp. 12,0 °C
 Zone T-stat Check 1 of 1 OK
 Max zone temperature deviation 0,0 °K

Central Heating Coil Sizing Data

Max coil load 168,9 kW
 Coil L/s at Des Htg 16864 L/s
 Max coil L/s 16864 L/s
 Water flow @ 5,0 °K drop 8,09 L/s

Load occurs at Des Htg
 W/m² 25,9
 Ent. DB / Lvq DB 17,4 / 25,8 °C

Supply Fan Sizing Data

Actual max L/s 16864 L/s
 Standard L/s 16689 L/s
 Actual max L/(s-m²) 2,58 L/(s-m²)

Fan motor BHP 44,29 BHP
 Fan motor kW 35,13 kW
 Fan static 600 Pa

Outdoor Ventilation Air Data

Design airflow L/s 11335 L/s
 L/(s-m²) 1,74 L/(s-m²)

L/s/person 323,86 L/s/person

Medida de melhoria 4

Air System Information

Air System Name **UTA_dimensionamento 4ª medida**
 Equipment Class **CW AHU**
 Air System Type **SZCAV**

Number of zones **1**
 Floor Area **6528,0** m²
 Location **Lisbon, Portugal**

Sizing Calculation Information

Calculation Months **Jan to Dec**
 Sizing Data **Calculated**

Zone L/s Sizing **Sum of space airflow rates**
 Space L/s Sizing **Individual peak space loads**

Central Cooling Coil Sizing Data

Total coil load **263,0** kW
 Sensible coil load **233,0** kW
 Coil L/s at Aug 1500 **16864** L/s
 Max block L/s **16864** L/s
 Sum of peak zone L/s **16864** L/s
 Sensible heat ratio **0,886**
 m²/kW **24,8**
 W/m² **40,3**
 Water flow @ 5,0 °K rise **12,59** L/s

Load occurs at **Aug 1500**
 OA DB / WB **32,6 / 20,7** °C
 Entering DB / WB **26,2 / 18,5** °C
 Leaving DB / WB **14,6 / 13,9** °C
 Coil ADP **13,3** °C
 Bypass Factor **0,100**
 Resulting RH **50** %
 Design supply temp. **12,0** °C
 Zone T-stat Check **1 of 1** OK
 Max zone temperature deviation **0,0** °K

Central Heating Coil Sizing Data

Max coil load **139,7** kW
 Coil L/s at Des Htg **16864** L/s
 Max coil L/s **16864** L/s
 Water flow @ 5,0 °K drop **6,69** L/s

Load occurs at **Des Htg**
 W/m² **21,4**
 Ent. DB / Lvg DB **17,4 / 24,3** °C

Supply Fan Sizing Data

Actual max L/s **16864** L/s
 Standard L/s **16689** L/s
 Actual max L/(s-m²) **2,58** L/(s-m²)

Fan motor BHP **44,29** BHP
 Fan motor kW **35,13** kW
 Fan static **1000** Pa

Outdoor Ventilation Air Data

Design airflow L/s **11333** L/s
 L/(s-m²) **1,74** L/(s-m²)

L/s/person **323,80** L/s/person

