



Estudo do comportamento térmico de gabinetes médicos de unidades hospitalares

Francisco António Cabaço Belo Sanches da Natividade

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Civil

Orientadores

Professora Doutora Maria da Glória de Almeida Gomes

Professor Doutor António Heleno Domingues Moret Rodrigues

Júri

Presidente: Professor Doutor Jorge Manuel Caliço Lopes de Brito

Orientador: Professora Doutora Maria da Glória de Almeida Gomes

Vogal: Professor Doutor Rogério José da Silva Correia Duarte

Maió 2019



Estudo do comportamento térmico de gabinetes médicos de unidades hospitalares

Dissertação elaborada no âmbito do projeto CuCa_RE: cure and Care_the Rehabilitation

Projeto PTDC / ATP-AQI / 2577 / 2014

FCT Fundação para a Ciência e a Tecnologia

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E DO ENSINO SUPERIOR

Portugal

Declaração

Declaro que o presente documento é um trabalho original da minha autoria e que cumpre todos os requisitos do Código de Conduta e Boas Práticas da Universidade de Lisboa.

Agradecimentos

A realização desta dissertação de mestrado não teria sido possível sem a colaboração e cooperação de muitas pessoas. Por isso, manifestamente, quero agradecer a todos os que de uma maneira ou de outra contribuíram para a concretização deste trabalho.

Em primeiro lugar gostaria de agradecer à Prof^a. Maria Glória Gomes e ao Prof. António Moret Rodrigues a orientação, a partilha de conhecimento bem como a disponibilidade e o acompanhamento contínuo ao longo de todo este trabalho.

Quero agradecer à Júlia Pereira pelo apoio prestado ao longo da campanha experimental e pela ajuda na construção do modelo de simulação.

Quero também agradecer às Prof^{as} Ana Tostões e Daniela Arnauld pela ajuda nos contactos iniciais realizados e pela partilha de informação acerca da história e arquitetura do edifício Dr. Francisco Gentil.

Gostaria também de expressar o meu agradecimento ao Instituto Português de Oncologia (IPO) de Lisboa, e em particular ao Arquitecto Nuno Figueiredo e ao Eng. João Caldeira, pela colaboração neste estudo, atenção prestada e autorização para a realização do estudo experimental no edifício Dr. Francisco Gentil.

Não poderia também deixar de agradecer à Dra. Maria de Jesus Moura e à Dra. Cecília Moura por terem, gentilmente, autorizado a monitorização e instalação de equipamentos de medição nos seus respetivos gabinetes de consulta médica.

À FCT (Fundação para a Ciência e Tecnologia), dado o trabalho ter sido desenvolvido no âmbito do projeto de investigação CuCa_RE: Cure and Care_the rehabilitation (PTDC/ATP-AQI/2577/2014).

A todos os meus amigos que sempre me apoiaram nesta etapa da minha vida.

E por último, mas não menos importante, à minha família pelo carinho, motivação e apoio incondicional durante todo o meu percurso académico.

A todos muito obrigado!

Resumo

A construção e sobretudo a reabilitação de edifícios antigos, com vista à redução do consumo de energia, satisfazendo as atuais exigências de conforto, assumem hoje uma grande relevância. Do edificado existente, os hospitais pela natureza da sua função e o tipo de serviços e cuidados que prestam são por um lado grandes consumidores de energia, mas por outro onde o potencial de economia da mesma é maior. Este trabalho pretende efetuar um estudo experimental e de simulação das características de comportamento térmico de gabinetes médicos de um edifício hospitalar. Para tal foi realizada uma campanha experimental em dois gabinetes médicos com orientações solares distintas, do edifício Dr. Francisco Gentil do IPO de Lisboa. Os resultados obtidos permitiram inferir sobre as condições de funcionamento real a nível térmico, quer dos elementos construtivos quer do ambiente interior, o que constitui uma importante informação de suporte para qualquer estratégia de melhoria da eficiência energética. Posteriormente, elaborou-se um modelo de simulação dos gabinetes através do programa EnergyPlus. Após a calibração do referido modelo com os resultados experimentais, foi simulado um conjunto de possíveis soluções de reabilitação energética que potenciam um melhor desempenho energético do edifício. A aplicação pelo exterior de isolamento térmico em poliestireno extrudido (XPS) na fachada exterior e cobertura (com 6 e 7 cm, respetivamente) e a substituição do envidraçado simples incolor existente por um envidraçado duplo refletivo revelou ser uma boa proposta de reabilitação energética, com uma economia de energia da ordem dos 50% nos gabinetes estudados.

Palavras-chave: hospitais, comportamento térmico, monitorização, simulação

Abstract

The construction and especially the rehabilitation of old buildings, in order to reduce the energy consumption, satisfying the current requirements of comfort, are nowadays of great relevance. Hospitals are buildings that by the nature of their function - providing health care with maximum comfort, hygiene and safety - are a priori high energy consumers. This fact also makes them buildings where the potential of energy saving is high. This work intends to carry out an experimental and simulation study to assess the thermal behavior of medical offices. For this purpose, the monitoring of the environment and building envelope of two representative medical offices in the Francisco Gentil Building of IPO (Lisbon) with different solar orientations, was conducted during both the heating and cooling seasons. The obtained results allowed inferring about the actual thermal performance, at both the constructive and environmental level, which constitutes important supporting information for any strategy to improve energy efficiency. Along with the experimental campaign, an EnergyPlus simulation study of the offices was performed. After the calibration of the model with the experimental results, a set of possible energy retrofitting solutions was simulated that enhance the energy performance of the building. The external application of XPS thermal insulation in the exterior facade and roof (with 6 and 7 cm, respectively) and the replacement of the existing single clear glazing unit by a double reflective glazing unit proved to be a proper proposal of energy rehabilitation, with energy savings of up to 50% in the offices studied.

Key words: hospitals, thermal behavior, monitoring, simulation

Índice

Agradecimentos.....	i
Resumo.....	iii
Abstract.....	v
Índice.....	vii
Lista de Figuras.....	x
Lista de Tabelas.....	xiv
Nomenclatura.....	xvi
1.Introdução.....	1
1.1 Enquadramento.....	1
1.2 Objetivos e metodologia do trabalho.....	2
1.3 Organização do trabalho.....	4
2. Estado de arte.....	5
3. Caso de estudo.....	15
4. Campanha experimental.....	21
5. Análise e discussão de resultados experimentais.....	25
5.1 Campanha de Inverno.....	25
5.1.1 Temperaturas e Radiação.....	25
5.1.2 Fluxos de calor.....	29
5.1.3 Coeficientes de transmissão térmica.....	31
5.1.4 Análise em frequência.....	33
5.2 Campanha de verão.....	34
5.2.1 Temperaturas e radiação solar.....	35
5.2.2 Fluxos de calor.....	38
6. Modelação e simulação energética do caso de estudo.....	41
6.1 Modelo de Simulação.....	41
6.1.1 Localização e período de simulação.....	43
6.1.2 Envolvente Opaca e Envidraçados.....	44

6.1.3 Ganhos internos, padrões de utilização do gabinete (horário de ocupação do gabinete) e ventilação.....	48
6.1.4 Obtenção de Dados.....	50
6.2 Calibração do Modelo de Simulação.....	50
7. Análise do impacte de intervenções de reabilitação energética.....	53
7.1 Considerações gerais.....	53
7.2 Piso intermédio	55
7.2.1 Envidraçados.....	55
7.2.2 Envolvente opaca	61
7.2.3 Impacte da combinação das intervenções.....	63
7.3 Piso de cobertura	69
7.3.1 Impacte da combinação das intervenções.....	69
8. Conclusões e Desenvolvimentos futuros	75
8.1 Conclusão	75
8.2 Desenvolvimentos futuros	79
Referências	81

Lista de Figuras

Figura 1.1 - Metodologia adotada para a realização do trabalho	3
Figura 3.1 - Escola de enfermagem Francisco Gentil em 1944	15
Figura 3.2 - Localização do caso de estudo: a) localização do edifício no recinto do IPO; b) edifício em 2019	16
Figura 3.3 - Planta do 2ºPiso: Localização dos gabinetes	17
Figura 3.4 - Gabinete de Psicologia.....	17
Figura 3.5 - Gabinete de Dermatologia.....	18
Figura 3.6 - a) Apresentação esquemática da fachada dos gabinetes; b) Pormenor da parede espessa; c) Furo transversal na parede fina.....	19
Figura 3.7 - Termografia da fachada do edifício.....	19
Figura 3.8 - Pormenor da solução construtiva da parede divisória	20
Figura 3.9 - Cobertura do edifício	20
Figura 4.1 - Apresentação esquemática da colocação dos termopares.....	21
Figura 4.2 - Apresentação esquemática da colocação dos fluxímetros (sentido do fluxo de calor)	22
Figura 4.3 - Sensores utilizados nos gabinetes: a) piranómetro LI-COR LI200 (em baixo), luxímetro LI-COR LI210R (em cima) e termopar; b) fluxímetro na superfície interior do vidro; c) fluxímetro e termopar, na superfície interior da parede; d) termopares na superfície e próximo do radiador.....	22
Figura 4.4 - Sistemas de aquisição de dados: a) Campbell CR10X; b) Delta-T DL2e; c) HOBO.....	23
Figura 5.1 - Temperaturas: a) Dia mais frio (DMF); b) Dia com climatização (DAQ); c) Dia de menor radiação solar (DmR).	26
Figura 5.2 - Fluxos de Calor: a) Dia mais Frio (DMF); b) Dia com menor radiação solar (DmR); c) Dia com climatização (DAQ)	30
Figura 5.3 - Coeficiente de transmissão térmica das paredes fina e espessa do gabinete de psicologia .	32
Figura 5.4 - a) Temperaturas ambiente exterior (T_e) e interior (T_i) do Gabinete de Psicologia e; b) frequências e amplitudes (D_{T_e} e D_{T_i}) por aplicação da TF entre 9 e 24 de março de 2018.....	34
Figura 5.5 - Temperaturas: a) Dia de menor radiação solar (DmR); b) Dia de maior radiação solar (DMR).	35
Figura 5.6 - Fluxos de Calor: a) Dia com menor radiação solar (DmR); b) Dia com maior radiação solar (DMR).....	39

Figura 6.1 - Geometria dos gabinetes no programa Google Sketchup	42
Figura 6.2 – Subgrupo “ <i>Building</i> ” do ficheiro IDF	43
Figura 6.3 - Subgrupo “ <i>Site:Location</i> ” do ficheiro IDF	44
Figura 6.4 - Subgrupo “ <i>Construction</i> ” do ficheiro IDF.....	45
Figura 6.5 - Subgrupo “ <i>Window Material: Glazing</i> ” do ficheiro IDF	46
Figura 6.6 - Subgrupo “ <i>Window Material: Blind</i> ” do ficheiro IDF	46
Figura 6.7 - Subgrupo “ <i>Building Surface Detailed</i> ” do ficheiro IDF	47
Figura 6.8 - Subgrupo “ <i>WindowProperty:Frame and Divider</i> ” do ficheiro IDF	47
Figura 6.9 - Subgrupo “ <i>Window Property: Shading control</i> ” do ficheiro IDF	47
Figura 6.10 - Subgrupo “ <i>Fenestration Surface:Detailed</i> ” do ficheiro IDF.....	48
Figura 6.11 - Subgrupo “ <i>People</i> ” do ficheiro IDF	48
Figura 6.12 - Subgrupo “ <i>Lights</i> ” do ficheiro IDF	49
Figura 6.13 - Subgrupo “ <i>Electric Equipment</i> ” do ficheiro IDF	49
Figura 6.14 - Subgrupo “ <i>ZoneInfiltration: DesignFlowRate</i> ” do ficheiro IDF	50
Figura 6.15 - Subgrupo “ <i>Output:Variable</i> ” do ficheiro IDF	50
Figura 6.16 - Comparação da temperatura ambiente interior simulada no EnergyPlus com a temperatura ambiente interior registada na campanha experimental nos dias 10 a 15 de julho.	51
Figura 7.1 – Metodologia adotada para a simulação das medidas de intervenção	53
Figura 7.2 - Subgrupo “ <i>HVACTemplate:Thermostat</i> ” do ficheiro IDF.....	54
Figura 7.3 - Subgrupo “ <i>HVACTemplate:ZoneIdealLoadsAirSystem</i> ” do ficheiro IDF.....	54
Figura 7.4 - Subgrupo “ <i>WindowMaterials:Glazing</i> ” do ficheiro IDF	55
Figura 7.5 - Subgrupo “ <i>Construction</i> ” do ficheiro IDF	55
Figura 7.6 - Subgrupo “ <i>WindowMaterials:Gas</i> ” do ficheiro IDF.....	55
Figura 7.7 - Necessidades de Aquecimento e Arrefecimento do gabinete quando aplicados os 4 envidraçados em estudo para: a) fachada exterior orientada a Oeste; b) fachada exterior orientada a Este; c) fachada exterior orientada a Norte; d) fachada exterior orientada a Sul.	57

Figura 7.8 - Energia total anual consumida no gabinete quando aplicados os 4 envidraçados em estudo para: a) fachada exterior orientada a Oeste; b) fachada exterior orientada a Este; c) fachada exterior orientada a Norte; d) fachada exterior orientada a Sul.	60
Figura 7.9 - Energia total anual consumida no gabinete de Dermatologia quando aplicado um isolamento de XPS pelo interior e pelo exterior.	61
Figura 7.10 - Necessidades de energia útil de Aquecimento e Arrefecimento dos 4 gabinetes em estudo para o caso original e para a situação em que é aplicado: a) o conjunto A de medidas de intervenção; b) o conjunto B de medidas de intervenção	65
Figura 7.11 - Energia final anual consumida nos 4 gabinetes em estudo para o caso original e para a situação em que é aplicado: a) o conjunto A de medidas de intervenção; b) o conjunto B de medidas de intervenção	66
Figura 7.12 - Período de Retorno Simples Final	68
Figura 7.13 - Energia total anual consumida no gabinete de Dermatologia quando aplicado o conjunto A de medidas de intervenção na fachada exterior e um isolamento de XPS pelo exterior na cobertura.....	70
Figura 7.14 - Necessidades de energia útil de Aquecimento e Arrefecimento dos quatro gabinetes em estudo para o caso original e para a situação em que são aplicados o conjunto A de medidas de intervenção na fachada exterior e uma placa de XPS (7cm) na cobertura.	71
Figura 7.15 - Energia total final consumida nos quatro gabinetes em estudo para o caso original e para a situação em que são aplicados o conjunto A de medidas de intervenção na fachada exterior e uma placa de XPS (7cm) na cobertura.	73
Figura 7.16 - Período de Retorno Simples Final	74

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 - Estudos anteriores realizados em Hospitais.....	9
Tabela 4.1 - Características dos equipamentos utilizados.....	15
Tabela 5.1 - Valores médios, máximos e mínimos das temperaturas exterior (T_e) e interior (T_i), superficiais exterior (T_{se}) e interior (T_{si}) das paredes e radiação global vertical exterior, no DMF.....	28
Tabela 5.2 - Valores médios, máximos e mínimos das temperaturas exterior (T_e) e interior (T_i), superficiais exterior (T_{se}) e interior (T_{si}) das paredes e radiação global vertical exterior, no DmR.....	28
Tabela 5.3 - Valores médios, máximos e mínimos das temperaturas exterior (T_e) e interior (T_i), superficiais exterior (T_{se}) e interior (T_{si}) das paredes e radiação global vertical exterior, no DAQ.....	28
Tabela 5.4 - Valores médios, máximos e mínimos das temperatura superficial (T_{SAQ}) do aparelho de climatização e temperatura do ar (T_{arAQ}) próxima deste, no DAQ.....	29
Tabela 5.5 - Valores médios, máximos e mínimos das temperaturas exterior (T_e) e interior (T_i), superficiais exterior (T_{se}) e interior (T_{si}) das paredes e radiação global vertical exterior, no DmR.....	37
Tabela 5.6 - Valores médios, máximos e mínimos das temperaturas exterior (T_e) e interior (T_i), superficiais exterior (T_{se}) e interior (T_{si}) das paredes e radiação global vertical exterior, no DMR.....	38
Tabela 6.1 - Propriedades térmicas da solução construtiva da “Parede Espessa”.....	44
Tabela 6.2 - Propriedades térmicas da solução construtiva da “Parede Fina”.....	45
Tabela 6.3 - Propriedades térmicas das paredes interiores.....	45
Tabela 6.4 - Propriedades térmicas da solução construtiva do pavimento.....	45
Tabela 7.1 - Período de Retorno Simples para a aplicação do conjunto A de medidas de intervenção....	68
Tabela 7.2 - Condutibilidades térmicas dos materiais constituintes da cobertura.....	69
Tabela 7.3 - Período de Retorno Simples para a aplicação das medidas de intervenção em estudo.....	74

Nomenclatura

Pf: Parede Fina

Pe: Parede Espessa

Env: Envidraçado

T_i: Temperatura ambiente interior [°C]

T_e: Temperatura ambiente exterior [°C]

T_{si}: Temperatura superficial interior [°C]

T_{se}: Temperatura superficial exterior [°C]

T_{SAQ}: Temperatura superficial do aparelho de climatização [°C]

T_{arAQ}: Temperatura ambiente próxima do aparelho de climatização [°C]

Rad_{v,e}: Radiação solar exterior no plano vertical da fachada [W/m²]

q: Fluxo de calor [W/m²]

I_{v,e}: Iluminância exterior no plano vertical da fachada [lux]

DMF: Dia mais frio

DmR: Dia de menor radiação solar

DMR: Dia de maior radiação solar

DAQ: Dia com climatização

U: Coeficiente de transmissão térmica [W/m²°C]

U_{ref}: Coeficiente de transmissão térmica de referência [W/m²°C]

DFT: Transformada de Fourier Discreta

RMSE: Root Mean Square

MBE: Mean Bias Error

Nic: Necessidades de energia útil na estação de aquecimento [kWh/m²ano]

Nvc: Necessidades de energia útil na estação de arrefecimento [kWh/m²ano]

PRS: Período de Retorno Simples [ano]

1.Introdução

1.1 Enquadramento

As alterações climáticas, ao ritmo acelerado a que estão a ocorrer, por motivo do aquecimento global, constituem um problema atual pela ameaça que representam a nível social, económico e sobretudo ambiental. De cariz global e com tendência a agravar, este problema tem sido combatido, dentro do possível, com a implementação de energias renováveis como alternativa aos combustíveis fósseis e com o recurso a campanhas de sensibilização para a preservação do planeta e poupança energética.

Com efeito, as políticas ambientais de combate ao efeito nocivo das emissões de gases com efeito de estufa, por um lado, assim como o contínuo aumento da procura de energia, por outro, levam a que o cenário mundial energético esteja em constante mutação.

Se a falta de informação acerca do aquecimento global e a crença na inesgotabilidade dos combustíveis fósseis promoveram, outrora, a construção de edifícios descuidando a conservação de energia, atualmente esta assume uma importância considerável no sector. Na procura de sustentabilidade no sector da construção, é hoje essencial o cumprimento das diretivas europeias dirigidas para a construção e reabilitação de edifícios. Com efeito, “são necessárias medidas para aumentar o número de edifícios que não se limitem a cumprir os atuais requisitos mínimos de desempenho energético, mas que os ultrapassem, reduzindo assim tanto o consumo de energia como as emissões de dióxido de carbono” [1].

Em conformidade com a evolução dos padrões de vida das populações e com o aumento do seu tempo de permanência nos edifícios, por um lado, e com a evolução da tecnológica no sector da construção onde as exigências de segurança estão atualmente dominadas, por outro lado, surge, na conceção dos edifícios atuais, um conjunto de novas exigências associadas ao conforto e bem-estar dos seus utentes, como é o caso do conforto térmico. Desta feita, o conforto térmico, definido como “aquela condição da mente que expressa satisfação com o seu ambiente térmico” [2], assume atualmente grande destaque. Dependendo quer de variáveis físicas e ambientais, quer de variáveis humanas, e por essa razão, dotada de alguma complexidade, esta temática tem merecido maior atenção [3,4] pela importância que assume na melhoria das condições de vida das populações.

Deste modo, é hoje de primordial importância a implementação de novas soluções construtivas que controlando os parâmetros influentes no desempenho térmico do edifício - temperatura, humidade relativa, renovações do ar por hora - promovam e assegurem as condições necessárias a fim de satisfazer os níveis de conforto preconizados atualmente para o ambiente interior dos edifícios. Refira-se ainda a este respeito que a regulamentação térmica e energética tem vindo a introduzir requisitos à envolvente térmica cada vez mais exigentes de modo a limitar as trocas de calor pela envolvente e assim conduzir a maiores poupanças energéticas nos edifícios para manter condições de conforto térmico interior.

Pelo exposto, a construção e sobretudo a reabilitação de edifícios antigos, com vista à redução do consumo de energia satisfazendo as atuais exigências de conforto, assumem hoje uma grande relevância.

Os grandes centros urbanos são caracterizados por um edificado bastante envelhecido, e por isso, com necessidades de intervenção. Do referido edificado, os hospitais são edifícios cuja funcionalidade, desempenho energético e adaptação à evolução tecnológica são aspetos primordiais que devem estar assegurados. São também edifícios onde a necessidade de controlo dos parâmetros ambientais tem uma relevância acrescida face aos edifícios correntes, dado que os seus principais utilizadores exigem cuidados de saúde variados e, nesta medida, assegurar as condições exigidas para o ambiente interior é uma medida de fundamental importância.

Por outro lado, são edifícios que pela sua dimensão, operacionalidade e sofisticação, são à partida elevados consumidores de energia, pelo que uma correta intervenção, enquadrada nas diretivas europeias ao nível da envolvente potencia uma economia efetiva no consumo de energia. Naturalmente, os edifícios hospitalares de construção anterior à entrada em vigor das diretivas europeias sobre a eficiência energética de edifícios constituem casos onde a implementação dos padrões de eficiência atualmente preconizados encontra maiores dificuldades de inclusão pelo que, e tendo em conta o seu potencial económico, deve dar-se continuidade às políticas e estudos que procuram, de uma forma gradual, implementar medidas de maior racionalização e eficiência energética neste tipo de edifícios.

No que diz respeito à física da construção de uma unidade hospitalar, uma envolvente construída ou intervencionada com base em soluções construtivas inovadoras contribui consideravelmente para a sua sustentabilidade na medida em que as técnicas e soluções de isolamento disponíveis atualmente permitem controlos de fluxos de calor mais favoráveis, isto é, menores perdas de calor no inverno e menores ganhos no verão. Desta feita, os estudos e as obras de reabilitação neste tipo de edifícios ganham atualmente maior expressão não só pelas vantagens do ponto de vista da economia de energia, como também pelo maior conforto que podem proporcionar aos seus utilizadores.

1.2 Objetivos e metodologia do trabalho

O presente trabalho tem como objetivo o estudo do comportamento térmico de gabinetes médicos de unidades hospitalares, cuja construção é antiga, e por isso, anterior às diretivas europeias que visam a eficiência energética em edifícios. É também propósito deste trabalho apresentar soluções de melhoria do desempenho térmico desses gabinetes justificadas através das poupanças energéticas conseguidas. Escolheu-se como caso de estudo o edifício da antiga Escola Superior de Enfermagem Francisco Gentil do Instituto Português de Oncologia (IPO) de Lisboa que, pelas suas características, dimensão e potencial de reabilitação energética representa um caso de estudo pertinente, quer para avaliar o comportamento térmico atual, quer para identificar potenciais soluções de reabilitação e oportunidades de melhoria do seu

desempenho térmico. Para o efeito, procedeu-se à instrumentação do ambiente e elementos da envolvente de dois gabinetes médicos representativos, com orientações solares distintas, através da utilização de equipamento adequado de medida e registo com capacidade de monitorizar espacial e temporalmente temperaturas e fluxos de calor, durante as estações de arrefecimento e aquecimento. Numa fase posterior à campanha experimental realizada, elaborou-se um modelo de simulação dinâmica dos gabinetes através do programa EnergyPlus. Após a calibração do referido modelo com os resultados experimentais, foram efetuadas várias simulações a fim de obter um conjunto de possíveis soluções que potenciam um melhor desempenho energético para o edifício. Na Figura 1.1, apresenta-se o fluxograma que traduz a metodologia adotada na realização deste trabalho.

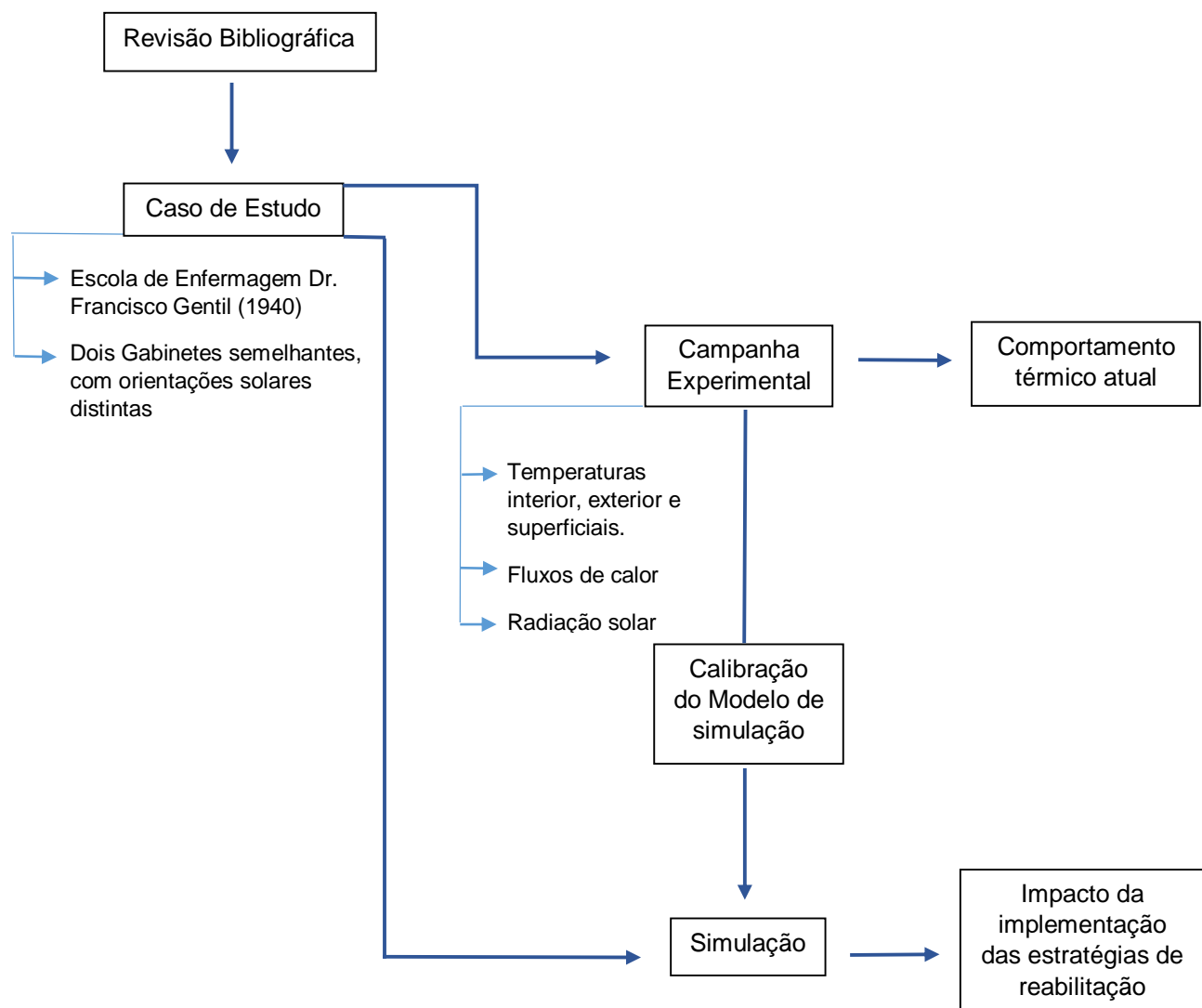


Figura 1.1 - Metodologia adotada para a realização do trabalho.

1.3 Organização do trabalho

O presente trabalho é composto por 8 capítulos, servindo o primeiro para um breve enquadramento e definição dos aspetos fundamentais do estudo realizado.

No capítulo 2, são apresentadas as principais conclusões de estudos anteriores realizados no domínio da térmica de edifícios, nomeadamente em edifícios hospitalares.

No capítulo 3, é feita uma descrição do caso de estudo apresentando uma caracterização geral da estrutura do edifício, da sua envolvente e das principais soluções construtivas dos elementos a analisar nos gabinetes em estudo.

No capítulo 4, é descrita a campanha experimental realizada bem como os parâmetros a analisar e os equipamentos necessários para a sua medição.

No capítulo 5, são apresentados os resultados obtidos experimentalmente e é feita a análise e discussão dos mesmos.

No capítulo 6, é descrito o processo da construção do modelo de simulação dos gabinetes em estudo e a calibração do mesmo com os resultados obtidos experimentalmente. São apresentados os resultados das simulações efetuadas que permitem a validação da campanha experimental realizada.

No capítulo 7, são apresentados e analisados os resultados obtidos para as simulações das várias medidas de intervenção quer ao nível da fachada exterior, quer ao nível da cobertura dos gabinetes em estudo.

No capítulo 8, são apresentadas as principais conclusões deste trabalho e são propostos desenvolvimentos futuros.

2. Estado de arte

As repercussões das alterações climáticas, bem como o impacte da emissão dos gases de efeito de estufa, fazem da energia um tema da atualidade, onde imperam os conceitos de conservação e eficiência aplicáveis a todos os setores de atividade.

No contexto dos referidos conceitos, o sector da construção assume uma considerável importância por ser responsável pelo consumo de uma grande parcela de energia a nível mundial. A China, como principal contribuinte, é responsável por aproximadamente um quinto do mercado mundial de energia e um quarto das emissões de CO₂ e, naturalmente, pelo desenvolvimento urbano que teve nos últimos anos, detém o sector da construção que mais energia consome no mundo [5]. No que diz respeito aos EUA e à Europa, este sector representa 39% e 40% do consumo de energia e 38% e 36% das emissões de CO₂, respetivamente [6].

Dentro da atividade de construção os edifícios, pelo seu elevado nível de produção e características de utilização, representam o sector com maior impacte no ambiente. Apontados como um dos principais contribuintes para as alterações climáticas, são responsáveis por um terço do total de emissões de CO₂ e por 40% do total de energia consumida na Europa [7]. Neste âmbito, o sector residencial, representando 75% do parque imobiliário europeu assume um grande destaque [8]. Em correspondência com o aumento do número de habitações e com o aumento do consumo de energia por domicílio, fomentado pelo crescente uso de aparelhos elétricos para fins de conforto e lazer, aos edifícios residenciais é atribuído um quarto do total de energia consumida na Europa [9]. No plano nacional, o consumo energético por parte do sector dos edifícios é também considerável. Embora as necessidades de arrefecimento e aquecimento dos edifícios nacionais sejam menores quando comparadas com as exigências apresentadas pelos edifícios de outros países com climas mais rigorosos tanto de inverno como de verão, estima-se que o referido consumo ascenda a 30% do total de energia consumida [10].

Por outro lado, é reconhecido nos edifícios um grande potencial de economia energética. Prevê-se no panorama Europeu que a implementação de medidas orientadas para a conservação de energia permitirá uma redução do consumo energético superior a 50% [10]. Por esta razão e tendo em conta a componente ambiental que lhe é inerente, nomeadamente a enorme redução das emissões de CO₂ que lhe está associada, este tema, também encarado como um desafio ambiental, tem merecido uma maior atenção. Neste sentido, a eficiência energética e a utilização de energias renováveis para fazer face ao consumo de combustíveis fósseis são, atualmente, objeto de campanhas, estudos e políticas mundiais.

Em 2016, a China, no seu 13º Plano quinquenal elaborou pela primeira vez um projeto com vista à economia de energia no sector da construção. Tendo por base a aplicação de medidas que fomentam a eficiência energética na construção e políticas para a implementação de edifícios verdes, este documento prevê uma redução do consumo de energia de 20% em 2020, face ao ano de 2015 [11].

Também na Europa foram lançadas diretivas neste sentido. Destas, destaca-se a diretiva 2010/31/EU “EU 20-20-20” cujo objetivos - 20% de redução das emissões de gases com efeito de estufa face ao ano 1990, ou de 30% caso estejam reunidas condições para tal, aumento em 20% da energia proveniente de fontes renováveis, aumento em 20% da eficiência energética - depois de cumpridos colocam a Europa no caminho da racionalização e eficiência energética [1]. Recentemente e reafirmando a posição da união europeia em relação a esta temática, foi publicada a diretiva (EU) 2018/844 que, alterando algumas emissivas quer da diretiva 2010/31/EU referente ao desempenho energético dos edifícios quer da diretiva 2012/27/EU sobre eficiência energética, tem por objetivo reforçar a necessidade dos estados membros atualizarem as políticas e as estratégias a fim de alcançar objetivos mais ambiciosos, relativos à emissão de gases com efeito de estufa e à eficiência energética, a curto, médio e longo prazo. Com efeito, os principais objetivos da referida diretiva passam por acelerar a renovação do parque imobiliário europeu através da implementação de estratégias orientadas para a transformação dos edifícios existentes em edifícios com necessidades quase nulas de energia, pela aposta na redução progressiva das emissões de gases com efeito de estufa - que deverá ser pelo menos de 40% a curto prazo (2030) - e por maior implantação de energias renováveis. Para o efeito, os estados membros deverão reforçar as campanhas de sensibilização e os mecanismos de apoio financeiro, a fim de desenvolver na Europa um sistema energético sustentável e descarbonizado até 2050 (longo prazo) [12].

Deste modo, a sustentabilidade da construção é atualmente uma prioridade tanto por motivos ambientais como económicos, que se encontra enquadrada nas diretivas mundiais, relativas ao desempenho energético dos edifícios através de linhas de atuação dirigidas quer para edifícios novos quer para edifícios existentes ou a necessitar de reabilitação. É, por isso, de primordial importância proceder à “introdução de tecnologias e materiais de construção que visem aumentar a eficiência nas habitações particulares, escritórios privados e edifícios públicos, privilegiando-se os projetos destinados ao edificado existente com pior desempenho energético e que, assim, promovam a redução do consumo de energia” [7].

A obtenção de energia através de fontes renováveis, combinada com um melhor desempenho energético proporcionado pelas soluções construtivas atuais, permitem atualmente a construção de um edifício quase autossustentável. Com efeito, quer para a envolvente opaca quer no domínio dos envidraçados, têm surgido novas soluções construtivas com propriedades térmicas melhoradas que potenciam grande economia de energia através de um controlo dos fluxos de calor pela envolvente - os ganhos no verão e as perdas no inverno – adequado às condições do clima. Por outro lado, se a compensação destes fluxos for feita através de uma fonte renovável (ex: painéis fotovoltaicos- radiação solar) ficam reunidas as condições para fazer do edifício um modelo tipo, com vista à conservação energética e à preservação do meio ambiente.

No entanto, em Portugal são poucos os edifícios que reúnem estas características. Os grandes centros urbanos estão envelhecidos e por isso com necessidades de intervenção a vários níveis, sobretudo na

envolvente dos edifícios que, pela função que assume, condiciona fortemente a eficiência energética dos mesmos.

Para fazer face a esta realidade, surgiu recentemente o “Aviso 25,- Eficiência energética nos edifícios”. Inserido no Plano nacional de ação para Eficiência energética (PNAEE), o referido documento, dirigido quer a pessoas singulares, quer a empresas e associações, pressupõe o financiamento de um conjunto de medidas - requalificação de sistemas de aquecimento de águas quentes sanitárias, instalação de janelas eficientes, requalificação do isolamento térmico segundo os respetivos regulamentos, iluminação eficiente - que contribuam para a melhoria do desempenho energético do edifício ou fração. Deste modo, o fundo de eficiência energética criado para o efeito, prevendo a possibilidade de um financiamento até 60% para quem concorra a este apoio, reafirma a preocupação atual com o desempenho ambiental dos edifícios e revela ser um bom incentivo à melhoria da conservação energética tanto do parque habitacional como do sector de comércio e serviços [13].

Não menosprezando os demais edifícios, os hospitais, como “serviços de interesse público, instituídos, organizados e administrados com o objetivo de prestar à população assistência médica curativa e de reabilitação” (artigo 1º do Regulamento Geral dos Hospitais (1968)) [14], são edifícios cuja funcionalidade, desempenho energético e adaptação à evolução tecnológica deve ser primordial e assegurada.

Caracterizados por padrões contínuos de uso e operação, os hospitais são edifícios com altos consumos de energia e munidos de sistemas sofisticados de aquecimento, ventilação e ar condicionado. Embora as suas características construtivas tenham um papel fundamental no que respeita à eficiência energética e desempenho térmico, é necessário e recorrente o uso dos referidos sistemas a fim de assegurar um conforto térmico satisfatório e manter os níveis de qualidade do ar interior exigidos para este tipo de edifícios. Tal facto traduz-se no consumo de uma quantidade contínua de energia, para aquecimento e arrefecimento, bem como para iluminação artificial e alimentação de equipamentos elétricos. Consequentemente, os Hospitais são responsáveis pelo maior consumo de energia por unidade de área construída no setor da construção, e no domínio dos edifícios públicos estima-se que estes são os edifícios menos eficientes em termos energéticos na maioria dos países Europeus, Norte Americanos e na China [15,16].

Em Portugal, no âmbito da implementação do Plano estratégico de baixo carbono e do programa de eficiência energética na administração pública, a Administração Central do Sistema de Saúde, (ACSS), é responsável pela análise e descrição dos consumos e custos com energia, água e produção de resíduos de todas as entidades do Ministério da Saúde, desde 2011. Com o fim de promover a eficiência energética, a eficiência hídrica e a redução da produção de resíduos, são elaborados, trimestralmente, relatórios nos quais constam os consumos e custos com a energia elétrica, gás e produção de resíduos, bem como a monitorização relativa à implementação de medidas conservativas, definidas no Despacho nº4128/2017. No que respeita ao consumo de energia elétrica, o referido documento define como meta uma poupança

igual ou superior a 80%, relativamente ao ano de referência (2011) [17].

No último relatório disponibilizado, referente ao segundo trimestre do ano de 2017, “das unidades hospitalares que reuniram condições para serem analisadas, apenas 21% cumpriram as metas do Despacho e 35% apresentaram consumos menores do que em 2011, não alcançando, no entanto, os objetivos definidos naquele diploma” [17]. Pelo exposto e considerando somente os hospitais que têm reportado os seus consumos desde 2011, o consumo total de energia elétrica, em 2017, foi de 262 GWh/ano, revelando-se uma redução no consumo face aos 268 GWh/ano referentes a 2011 [17]. Contudo, no que diz respeito aos custos, os resultados são menos animadores. Em 2017, os dados revelam um aumento do custo de energia na ordem dos 133% face a 2011 [17].

Como reconhecimento da sua importância, dimensão, operacionalidade e do nobre propósito de cuidar e salvar vidas, existe uma vasta literatura onde a par da eficiência energética, o conforto térmico assim como o bem-estar de todos os utilizadores de um Hospital, são uma preocupação. Com efeito, dispersas pelo mundo, foram levadas a cabo diversas investigações no domínio desta matéria, umas baseadas em inquéritos e monitorização “in situ” e outras, mais recentes, apoiadas em modelos e programas de simulação. Apresenta-se na Tabela 2.1 alguns estudos resumidos.

Khodakarami e Nasrollahi, na sua revisão de literatura, aferiram a importância e a influência direta que os parâmetros ambientais têm sobre o conforto térmico em Hospitais [18]. Referindo-se a vários estudos, e focando-se nas três principais variáveis que condicionam o referido conforto, concluíram que:

- Referentemente à humidade relativa, se por um lado níveis de humidade mais altos causam o crescimento e a transmissão de bactérias, por outro, níveis mais baixos originam a coagulação do sangue, secura da pele e nariz, irritação da garganta, problemas respiratórios e desconforto térmico, pelo que os padrões internacionais de humidade estabelecidos para este tipo de edifícios recomendam níveis situados entre os 30 e os 60%. Em salas de operação, onde é possível a acumulação de eletricidade estática devido ao uso de gases anestésicos inflamáveis e líquidos voláteis, são recomendados níveis de humidade superiores a 60%.

- Relativamente à temperatura, os padrões internacionais caracterizam como “desejável” uma temperatura situada entre 20 e 24°C, embora o uso de temperaturas mais baixas ou mais altas seja aceitável quando o conforto do paciente e /ou condições médicas o exigirem. Referindo-se a Balaras et al. concluíram que temperaturas interiores elevadas favorecem o crescimento de bactérias e promovem a sua migração para o paciente.

Tabela 2.1- Estudos anteriores realizados em Hospitais

Autores	Tipo de edifício	Local	Tipo de estudo	Principais conclusões
Khodakarami e Nasrollahi [18]	Hospital	Não se aplica	Revisão de literatura	No que diz respeito à humidade recomenda-se para este tipo de edifícios níveis situados entre 30 e 60%. Em salas de operação são recomendados níveis superiores a 60%. Uma temperatura situada entre 20 e 24°C é caracterizada como “desejável”. Por outro lado, temperaturas interiores elevadas favorecem o crescimento de bactérias e promovem a sua migração para o paciente. Em quartos com e sem climatização o número de renovações do ar por hora deve ser no mínimo de 4 e 6 Rph respetivamente sendo suficiente uma velocidade do ar de 0,1 m/s.
Valeria De Giuli et al. [19]	Hospital	Padua, Itália	Experimental	Foram registadas variações de temperatura atípicas pelo que o autor recomenda uma análise detalhada à envolvente do edifício.
Santamouris et al. [20]	Hospital	Grécia	Auditoria	O potencial de economia energética é cerca de 20%.
Nattanee Thinatea et al. [21]	Hospital	Tailândia	Análítico	Após a implementação de algumas medidas conservativas prevê-se para os edifícios em estudo uma redução de 15% do consumo de energia registado em 2010, até 2036.
Alfonso González et al. [22]	Hospital	Espanha	Análítico	Nos 20 hospitais em estudo nem a utilização de energia nem o desempenho das instalações foram devidamente otimizados.
Annamaria Buonomano et al. [15]	Hospital	Nápoles	Simulação	O edifício apresenta alta transmitância térmica na envolvente opaca e nos envidraçados. As características construtivas do edifício promovem um baixo desempenho energético e conforto térmico no Inverno.
Fabrizio Ascione et al- [23]	Hospital	Nápoles	Simulação	Foi simulada e projetada uma nova envolvente para o edifício que permitiu uma redução da transmissão térmica na ordem dos 44% e uma poupança anual no consumo de energia bastante significativa quando combinada com o sistema de climatização.
Alessandro Carbonari et al. [24]	Hospital	Itália	Simulação	Através da reabilitação da envolvente do edifício e da substituição do sistema de climatização o potencial económico energético é de 77 a 79% para os três hospitais em estudo.
Hanan M. Taleb et al. [25]	Hospital	Abu Dhabi	Simulação	A implementação de uma cobertura verde no hospital iria promover uma redução de ganho de calor na ordem dos 24.7%.
Ahmed et al. [26]	Hospital	Alexandria, Egipto	Simulação	O uso de isolamento térmico nas paredes e envidraçados mais eficientes conduzirão a uma redução de 8% no consumo de energia.
Frederico Silenzi et al. [27]	Hospital	Geneva, Itália	Simulação	A aplicação de um painel de isolamento adequado e a implementação de janelas rotativas inteligentes permitiria uma poupança de 930 MWh/ano na estação de aquecimento e de 1119 MWh/ano na estação de arrefecimento.

- O número de renovações do ar por hora pode controlar ou disseminar as infeções nos Hospitais pelo que também tem um impacto relevante nas condições de saúde dos pacientes. Revisando outros estudos concluíram que, em quartos com e sem climatização, para o conforto do paciente, o número de renovações do ar por hora deve ser no mínimo 4 e 6 Rph respetivamente, e que uma velocidade do ar de 0.1 m/s é suficiente.

- É recomendável a adoção de espaços com diferentes temperaturas e velocidades do ar, tendo em conta os diversos requisitos de conforto térmico, pois estudos com base em inquéritos concluíram que as exigências de conforto dependem da condição pessoal de cada interveniente no Hospital, ou seja, os pacientes esperam um ambiente térmico diferente do pessoal médico, que por sua vez têm requisitos ligeiramente diferentes dos enfermeiros.

Num outro estudo realizado em Itália, no hospital localizado na cidade de Pádua, caracterizada por um clima bastante húmido com invernos frios e verões quentes, foi feita uma campanha experimental em três edifícios distintos. Com recurso a data loggers HOBO, foram registados valores da temperatura do ar, da humidade relativa e iluminâncias das divisões de um piso tipo de cada edifício. Dos parâmetros analisados, o registo de variações de temperaturas e humidade atípicas em algumas salas dos edifícios, mais expressivas nas de canto, revelaram, na opinião do autor, uma possível deficiência na conceção ou manutenção do edifício, pelo que recomenda uma análise detalhada à envolvente do edifício na perspetiva de uma reabilitação futura. Paralelamente, foram ainda efetuados inquéritos a fim de aferir a satisfação com o edifício e conforto ambiental interior por parte dos pacientes e da equipa médica [19].

No âmbito da economia energética e a fim de aferir o seu potencial, é essencial o reconhecimento do consumo real de cada unidade hospitalar. Para o efeito, foram realizados diversos estudos com o objetivo de criar estratégias com vista à economia de energia apoiadas em critérios de projeto devidamente fundamentados. Em 1994, Santamouris et al. num estudo com base na análise do desempenho energético de 30 unidades hospitalares de Hellas, na Grécia, constataram que o consumo total médio anual de energia nos hospitais e nas clínicas foi de 407 e 275 kWh/m² respetivamente, correspondendo a maior percentagem do consumo à energia despendida em operações de climatização do ambiente. Após uma análise aos sistemas de climatização, de iluminação e à envolvente dos edifícios, os autores concluíram que com uma intervenção cuidada apoiada em técnicas de conservação de energia, o potencial de redução de energia era cerca de 20%. No que respeita à envolvente, a aplicação de um isolamento adequado contribuiria para referida economia, com uma poupança de 173 kWh/m² nos hospitais e 103 kWh/m² no caso das clínicas [20].

Na Tailândia, Nattanee et al. através de um estudo analítico com base no historial de consumo energético de 45 hospitais entre 2010 e 2015 concluíram que todos eles, com economias visíveis de ano para ano, se enquadram nas diretivas impostas pelo Plano de Eficiência Energética (EEP 2015), que prevê para estes edifícios uma redução de 15% do consumo de energia registado em 2010, até 2036 [21].

Num outro estudo analítico realizado em 20 hospitais espanhóis, entre 2005 e 2014, foi analisada a correlação entre o consumo anual de energia e três variáveis distintas - o número de trabalhadores, o número de camas e a área construída do edifício. Com efeito, apesar da análise traduzir a referida correlação com todas as variáveis em estudo, o autor ressalva que segundo os registos de graus-dia totais, para o conjunto de edifícios em estudo, não foi observada nenhuma relação entre o consumo de energia e as condições climáticas nos hospitais, o que evidenciou que nem a utilização de energia, nem o desempenho das instalações foram devidamente otimizados [22].

Como complemento foram realizados diversos estudos com base em modelos de simulação da envolvente exterior do edifício hospitalar, para melhor fundamentar a investigação sobre a eficiência energética, diversos estudos com base em modelos de simulação da envolvente exterior do edifício hospitalar foram realizados.

Em Nápoles foi realizado um estudo com base na análise de 3 edifícios - o 9A (de 6 andares), o 9F (de 2 andares) e o 9H (de 1 andar) - e um túnel de ligação entre dois deles (o 9A e o 9H) do Hospital Universitário Federico II. Caracterizados por terem paredes com massas relativamente altas e vidros simples nas janelas, os edifícios apresentam alta transmitância térmica na envolvente opaca e nos envidraçados, promovendo por isso um baixo desempenho energético e conforto térmico no Inverno, ao invés do que acontece no verão, onde os resultados são relativamente melhores. Recorrendo a modelos de simulação, foram analisadas várias soluções quer para a solução construtiva dos telhados dos edifícios, quer para os sistemas de climatização, nomeadamente a introdução de válvulas nos aparelhos de aquecimento e de um temporizador para desligar os aparelhos de climatização quando as salas não estão ocupadas. Com efeito, os resultados revelaram que apesar da solução mais eficaz, do ponto de vista da economia de energia, ser a intervenção ao nível dos sistemas de climatização, a proposta referente à física dos edifícios, que preconiza a introdução de uma camada de poliuretano (3 - 8 cm) nos telhados, permitiria uma redução significativa do coeficiente de transmissão térmica e por isso uma redução significativa no consumo de energia, tanto no inverno como no verão, no túnel de ligação e nos edifícios 9F e 9H, por estes serem relativamente mais baixos. De uma análise económica também realizada, a referida solução conduziria a uma poupança de 600 e 940 euros por ano nos edifícios 9F e 9H e de 150 euros por ano no túnel de ligação [15].

Também em Nápoles, com o recurso ao programa EnergyPlus utilizado na presente dissertação, foi simulada e projetada uma nova envolvente para o "Day Hospital of G. Instituto Pascale". A substituição dos envidraçados por vidros de baixa emissividade e o isolamento da envolvente opaca com painéis de poliestireno extrudido ($e = 10 \text{ cm}$, $\lambda = 0.04 \text{ Wm}^{-1} \text{ K}^{-1}$) permitiria uma redução da transmissão térmica na ordem de 44% e uma poupança anual no consumo de energia bastante significativa quando combinados com o sistema de climatização, também ele simulado [23].

Numa outra investigação realizada em cidades distintas de Itália, Carbonari et al. analisaram o potencial económico de três grandes hospitais: o hospital de San benetto del tronto, o Hospital de Urbino e o Hospital de Pergola. Todos os hospitais são constituídos por polos cuja data construção é de 1960-1970, pelo que apresentam fachadas envelhecidas e um isolamento térmico deficiente. Neste estudo, os autores estimam que através da reabilitação da envolvente do edifício e da substituição do sistema de climatização, o potencial económico energético seja de 77-79% para os três hospitais em estudo. Com efeito, foram analisadas várias intervenções direcionadas para a economia e eficiência energética. No que diz respeito às intervenções simuladas para a envolvente dos edifícios:

- A aplicação de um isolamento de poliestireno expandido (0.20 m) nas fachadas permitiria a redução do coeficiente de transmissão térmica (de 1.36 para 0.18 W/m²°C no hospital San Benetto del Tronto, de 0.71 para 0.16 W/m²°C no hospital de Perola e de 1.43 para 0.17 W/m²°C no hospital de Urbino) e a mitigação do efeito das pontes térmicas. Consequentemente a economia de energia para os 3 hospitais, pela ordem em cima apresentada, seria de 38%, 25% e 21%;

- A aplicação do mesmo isolamento na cobertura permitira igualmente a redução do coeficiente de transmissão térmica (de 0.89 para 0.17 W/m²°C no hospital de San Benetto del Tronto, de 0.50 para 0.15 W/m²°C no hospital de Perola e de 1.80 para 0.19 W/m²°C no hospital de Urbino), contribuindo para a redução no consumo de energia em 8%,10% e 9%.

- A introdução de novas janelas com vidro duplo de baixa emissividade e caixilharia em alumínio conduziria à redução do coeficiente de transmissão térmica (de 4.5 para 1.4 W/m²°C no hospital de San Benetto del Tronto, de 6.2 para 1.3 W/m²°C no hospital de Perola e de 6.5 para 1.3 W/m²°C no hospital de Urbino) e a uma economia de energia de 21%, 32% e 45%.

- A implementação das referidas propostas de intervenção em simultâneo levaria a uma redução no consumo de energia de 68%, 66% e 72% para os 3 hospitais em estudo.

Por outro lado, após uma análise económica, os autores ressaltam que apesar do potencial económico energético traduzido pelas intervenções acima descritas e por outras referentes aos sistemas de climatização ser elevado, os rácios de custo-benefício nem sempre são os melhores. Com efeito, o período de retorno simples em que o investimento inicial é pago com o valor referente à economia de energia varia para os três hospitais entre 13 a 20 anos, o que é bastante longo na opinião dos autores [24].

Em Abu Dhabi, no Hospital AL Cornich, foi realizado um estudo de simulação tendo como referência as diretrizes do Advanced Energy Design para pequenos hospitais e unidades de saúde (ASHRAE). Sendo o ganho de calor um dos principais problemas devido ao clima quente e árido da região, o estudo incidiu no mês de agosto por ser um dos meses mais quentes do ano (temperatura média 34°C). Com efeito, foram analisadas intervenções referentes aos envidraçados, às paredes e à cobertura. No que diz respeito aos envidraçados, a adição de um filme interno de cor clara permitiria a redução do coeficiente de transmissão térmica e consequentemente uma redução do ganho de calor. Os mesmos efeitos foram traduzidos nos

resultados referentes a uma segunda proposta de intervenção, que preconiza a introdução de um isolamento com melhores propriedades térmicas nas paredes exteriores. Referentemente à cobertura foi simulada a adição de uma nova camada constituída por fibra de vidro, arenito, areia e vegetação (164 mm). Deste modo, a cobertura verde projetada, com maior massa térmica e conseqüentemente condutividades térmicas mais altas, permitiria uma redução de ganho de calor na ordem dos 24.7%, tendo-se revelado na intervenção mais eficiente das propostas analisadas. Ainda para a cobertura, e com base na metodologia apresentada pelo Cool Roof Rating Council, foi analisada uma solução que preconiza a introdução de materiais de elevada refletividade denominada “Cool Roof”. Apesar de apresentar boas características térmicas que potenciam a redução da temperatura no interior do edifício, os resultados do estudo mostraram que a referida solução não é eficiente o suficiente para atingir os níveis de conforto interno num clima tão quente e húmido como o de Abu Dhabi [25].

Também recorrendo a modelos de simulação, um estudo num hospital da Alexandria (Egipto) concluiu que intervenções ao nível do sistema de climatização e da envolvente do edifício conduzirão a uma redução de 41 % no consumo de energia. Embora a maior percentagem de economia de energia seja referente à substituição dos aparelhos de climatização, os autores concluíram que a substituição dos envidraçados por um vidro duplo (6-6-6mm) de baixa emissividade e a aplicação de um isolamento “1.9 batt-insulation” nas paredes contribuiria para a referida economia em 8% [26].

Recentemente, com o objetivo de avaliar as necessidades de energia para aquecimento e arrefecimento do Pavilhão Monoblocco no hospital San Martino em Geneva (Itália), o comportamento térmico do edifício foi simulado através do programa EnergyPlus. Posteriormente e também com recurso ao referido programa, foi simulada a combinação das três seguintes intervenções:

- A aplicação de um painel de isolamento VIP da marca Isoleika constituído por: borracha laminada (3 + 3 mm) e isolamento VIP (30 mm); barreira de vapor de polietileno; isolamento de lã mineral (40 mm) em perfis verticais de alumínio independentes (46 mm); placa de fio orientado (9 mm); gesso cartonado (15 mm);
- A implementação de janelas rotativas inteligentes equipadas com um revestimento de baixa emissividade, que giram em torno de dobradiças alternando entre as configurações de verão / inverno, expondo o lado revestido para o exterior durante o período de maior radiação solar;
- A implementação de um sistema de iluminação LC LED e sistema de fibra ótica de luz solar, que captura e distribui a luz do sol dentro do edifício usando difusores adequados.

Dos vários cenários e parâmetros analisados, os autores destacam que o pacote de intervenções referente à implementação das duas primeiras intervenções acima referidas permitiria, face ao atual consumo, uma poupança de 930 MWh/ano na estação de aquecimento e de 1119 MWh/ano na estação de arrefecimento, revelando-se assim numa proposta de reabilitação tentadora com um potencial de economia elevado. Contudo, embora a concretização da referida obra seja viável economicamente, o período de retorno seria na ordem dos 27.4 anos, o que é elevado na opinião dos autores [27].

Pelo exposto, os estudos permitem concluir que a melhoria do desempenho energético dos hospitais, potenciada por soluções mais inovadoras ao nível da envolvente, climatização e iluminação do edifício, é reconhecidamente uma vantagem quer do ponto de vista da conservação da energia quer numa visão económica. De facto, se por um lado os hospitais cuja construção é mais antiga são casos onde a implementação das diretivas mundiais relativas à eficiência energética se torna mais difícil e dispendiosa, por outro são edifícios onde o potencial económico energético é maior. Desta feita, apesar do período de retorno ser elevado, deve proceder-se à reabilitação da envolvente do edifício com o recurso a técnicas construtivas eficientes, com vista a melhorar o referido desempenho, economizar energia e ser um exemplo enquadrado na visão mundial energética.

Referentemente a futuras construções de unidades hospitalares, estas devem ser realizadas atentando nas referidas diretivas e respeitando os procedimentos a fim de diminuir ao máximo o consumo de energia. Deve-se, portanto, ter em atenção a orientação do edifício, o clima ou as implicações climáticas do local onde vai ser construído e as técnicas e materiais selecionados para a parte opaca e para os envidraçados.

Por outro lado, e não descurando a natureza da sua função e aos serviços a que se destina, um hospital com um bom desempenho energético proporcionará inerentemente novos e melhores padrões de conforto às equipas médicas e aos pacientes.

3. Caso de estudo

Sendo a avaliação do desempenho térmico de unidades hospitalares o objetivo da presente dissertação, procedeu-se primeiramente à seleção de um edifício que pelas suas características, dimensão e potencial de reabilitação energética representasse um caso de estudo pertinente, quer para avaliar o comportamento térmico atual, quer para identificar potenciais soluções de reabilitação e oportunidades de melhoria do seu desempenho térmico. Deste modo, selecionou-se como caso de estudo [28] o edifício da antiga escola de enfermagem Francisco Gentil, do Instituto Português de Oncologia (IPO) de Lisboa (Figura 3.1).

Destinado a uma escola cujo objetivo era a formação de enfermeiras que assegurassem cuidados de enfermagem especializados aos pacientes do IPO, o referido edifício, projetado por Raul Lino e Ernst Kopp em 1938, teve a sua inauguração pela mão do, à data, diretor do IPO, Dr. Francisco Gentil, em 1944 [29].



Figura 3.1 - Escola de enfermagem Francisco Gentil em 1944 [30].

Com 4 pisos acima do solo e uma cave, apresenta soluções construtivas características da época, onde a estrutura mista de betão e alvenaria começava a ter expressão. No presente caso, a estrutura é em pórtico com lajes, vigas e pilares em betão armado e é dotada de paredes de fachada com duas soluções construtivas diferentes, respetivamente em zona de janela e zona corrente, a que correspondem também espessuras distintas. Com efeito, e evidenciando a época que marcava o início do uso de novos materiais na construção civil, as fachadas do edifício combinam dois tipos de alvenaria. São compostas por uma zona de alvenaria de tijolo maciço e por uma zona de alvenaria de pedra onde se inserem os elementos estruturais de betão do edifício.

Exteriormente o edifício apresenta um revestimento pétreo ao nível do primeiro piso, em todo o seu perímetro. Os restantes pisos são revestidos com reboco tradicional simples de argamassa cimentícia. Naturalmente, e à luz da data da sua construção, o edifício não possui materiais de isolamento térmico.

A menos de algumas reabilitações pontuais nas fachadas, e a construção de um pequeno anexo na cobertura, mantendo grande parte desta em terraço acessível, o edifício não sofreu qualquer alteração estrutural, apresentando a mesma morfologia desde da sua construção. Atualmente, e como se pode

observar na figura 3.2 b), somente as condições de sombreamento das fachadas foram alteradas, fruto do crescimento das árvores existentes em todo o seu perímetro.

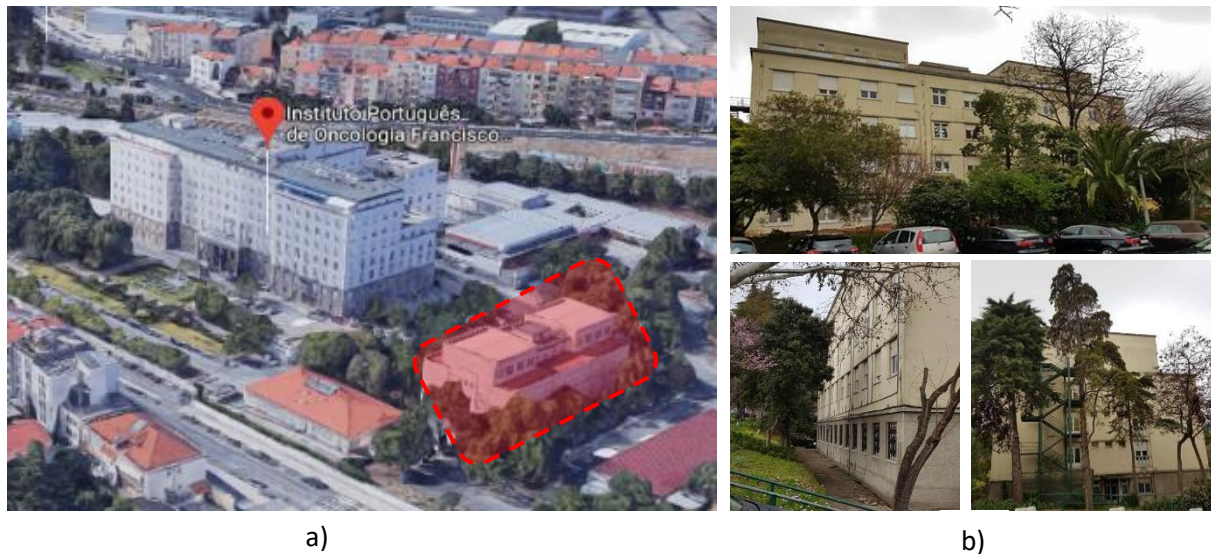


Figura 3.2 - Localização do caso de estudo: a) localização do edifício no recinto do IPO; b) edifício em 2019.

Para o presente estudo foram monitorizados dois consultórios médicos com geometria e taxa de ocupação semelhantes - o gabinete de Psicologia e o gabinete de Dermatologia (Figura 3.3). Situados em alas opostas do 2º Piso (piso intermédio), têm uma área de 14 m², um pé direito de 3m, mas orientações solares distintas. A parede exterior do gabinete de Psicologia está orientada a Este (E), pelo que recebe a radiação solar direta pela manhã. Ao invés, no gabinete de Dermatologia, cuja fachada está orientada a Oeste (W), a radiação solar incide maioritariamente pela tarde. Ambos os gabinetes são dotados de um radiador mural para aquecimento ambiente e de uma janela (1.70x1.45 m²) munida com envidraçados simples de vidro incolor de 3 mm, caixa de estores e caixilharia em madeira. A envolvente opaca de ambas as fachadas é constituída por uma zona mais espessa de alvenaria de pedra - designada como “Parede Espessa” (Pe) - , com uma espessura bastante considerável quando comparada com a restante área, de alvenaria de tijolo maciço, onde está instalada a janela - designada como “Parede Fina” (Pf). Em ambos os gabinetes, o pavimento é revestido com tacos de madeira e os acabamentos são simples, com um reboco tradicional e rodapés em madeira. Salienta-se ainda que os gabinetes estão sujeitos a algum sombreamento proveniente de árvores na zona circundante do perímetro do edifício.



Figura 3.3 - Planta do 2º Piso (piso intermédio): Localização dos gabinetes.

Tendo em conta o tipo de serviços e consultas a que se destinam, os gabinetes estão mobiliados de forma distinta. Servindo para consultas e tratamentos do foro psicológico onde são promovidas conversas longas entre o médico e o paciente, o gabinete de Psicologia é dotado de um espaço semelhante a uma sala de estar, onde figuram uma secretária e duas cadeiras que proporcionam o devido conforto aos intervenientes neste tipo de consultas. Por outro lado, o gabinete de dermatologia, onde as consultas requerem equipamentos especializados para observação física dos pacientes, é composto por duas secretárias que servem de apoio aos referidos equipamentos, uma maca e dois armários onde constam os medicamentos e o material médico. Ilustra-se nas Figuras 3.4 e 3.5 o espaço interior de cada gabinete.



Figura 3.4 - Gabinete de Psicologia.



Figura 3.5 - Gabinete de Dermatologia.

Como referido, a envolvente opaca do edifício combina dois tipos de alvenaria. Por ser através desta que se realizam as maiores trocas de calor, e por isso à qual se exige o melhor desempenho térmico possível, foi importante a identificação das soluções construtivas e os respetivos materiais que a constituem. Apesar de não haver qualquer informação disponível a este respeito, através de uma visita à obra do edifício adjacente, cuja data de construção remonta à mesma época, foi possível a caracterização da referida envolvente. Com efeito, e tendo em conta a morfologia análoga ao edifício em estudo foi possível concluir que à exceção de um pequeno pano de parede constituído por tijolo maciço, localizado entre a laje e a janela, toda a fachada é de alvenaria de pedra. Na Figura 3.6, pode observar-se um esquema da envolvente, bem como os pormenores construtivos do edifício do IPO adjacente com paredes análogas às do edifício em estudo. Posteriormente, realizou-se um estudo complementar recorrendo à técnica da termografia que permitiu identificar claramente duas zonas distintas referentes aos dois tipos de alvenaria que constituem a fachada exterior do edifício. Observa-se, na Figura 3.7, a zona de cor rosa/amarela correspondente à alvenaria de tijolo maciço denominada “Parede Fina” e uma zona numa gama de cores azul/roxo correspondente à alvenaria de Pedra denominada “Parede Espessa”.

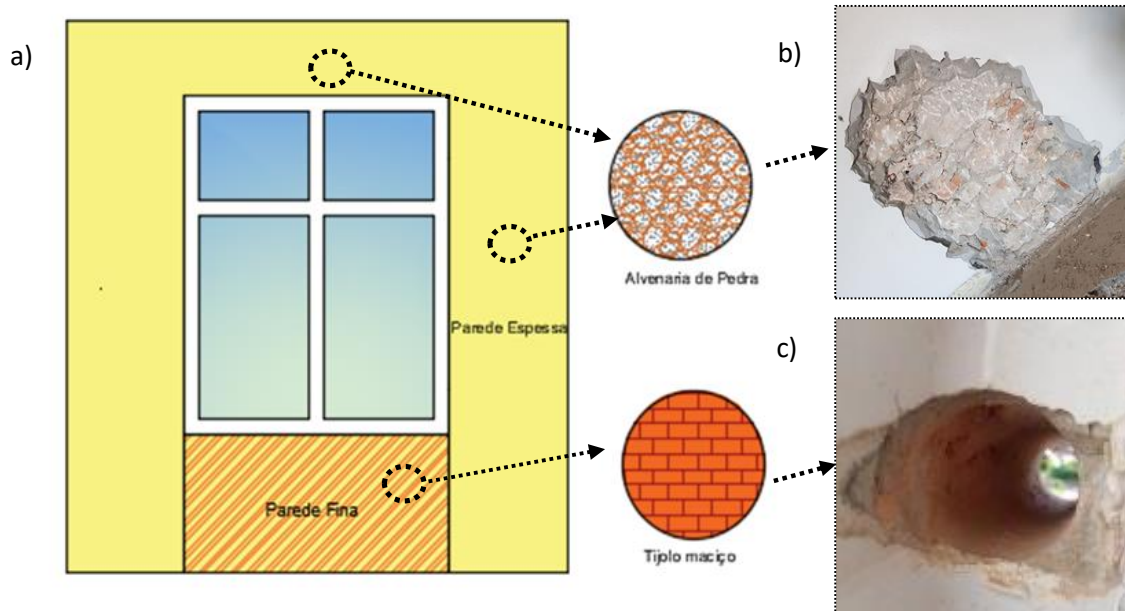


Figura 3.6 - a) Apresentação esquemática da fachada dos gabinetes; b) Pormenor da parede espessa; c) Furo transversal na parede fina.

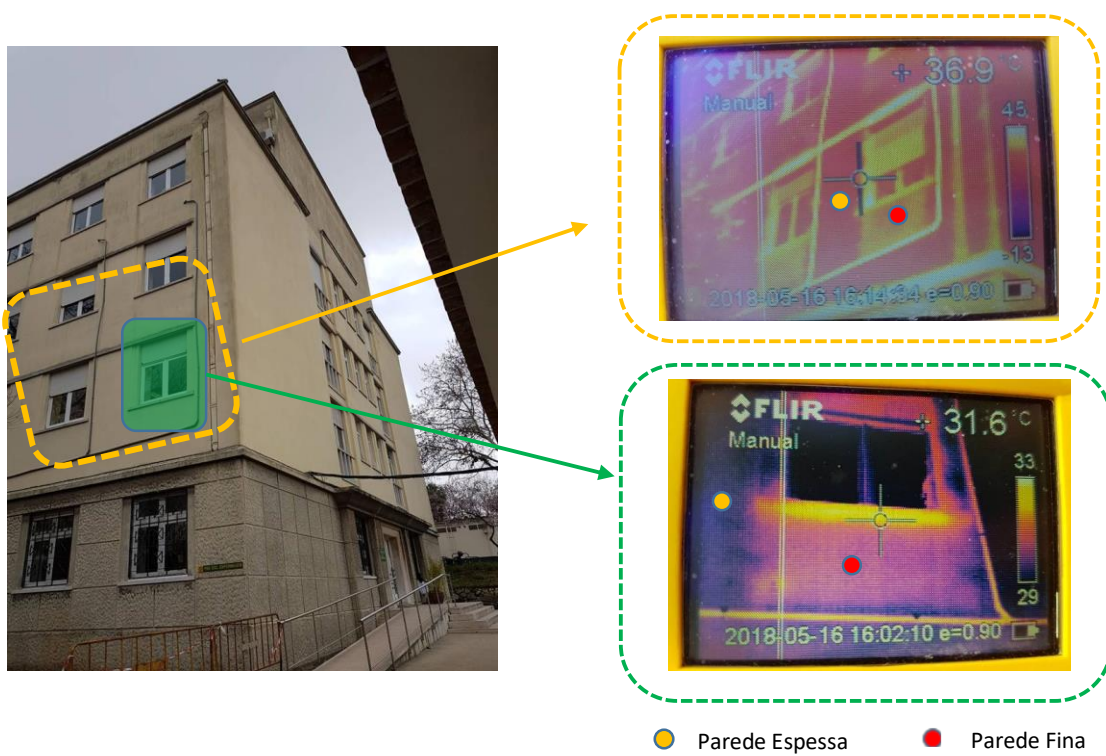


Figura 3.7 - Termografia da fachada do edifício.

No que diz respeito às paredes divisórias que separam os gabinetes contíguos do edifício, estas são constituídas por um tijolo furado como se pode observar na Figura 3.8.



Figura 3.8 - Pormenor da solução construtiva da parede divisória.

Relativamente à cobertura, como referido, parte desta é em terraço acessível e está revestida a ladrilhos cerâmicos como se pode observar na Figura 3.9.



Figura 3.9 - Cobertura do edifício.

4. Campanha experimental

A campanha experimental de monitorização “in situ” foi realizada nas estações de aquecimento e de arrefecimento, entre os dias 23 de fevereiro e 23 de setembro de 2018, simultaneamente nos gabinetes de Dermatologia e Psicologia.

Com o fim de aferir o desempenho térmico e lumínico, foram monitorizadas e medidas as seguintes grandezas:

- i) temperatura ambiente interior e exterior (T_i , T_e);
- ii) temperatura superficial interior e exterior dos envidraçados e paredes (T_{si} , T_{se});
- iii) radiação solar exterior no plano vertical da fachada ($Rad_{v,e}$);
- iv) fluxo de calor nos envidraçados e nas paredes (q);
- v) iluminância exterior no plano vertical da fachada ($I_{v,e}$);
- vi) temperatura superficial do aparelho de climatização (T_{sAQ}) e temperatura ambiente próxima do mesmo (T_{arAQ}).

No que respeita à medição das temperaturas, foram utilizados termopares do tipo T com 0.2 mm de espessura. Ressalva-se o facto de que, para a medição das temperaturas superficiais os termopares foram colocados diretamente na superfície de cada elemento, e para a medição das temperaturas ambiente a sua colocação foi por forma a que o sensor estivesse em contacto com o ar ambiente e não com a superfície do elemento onde foi colocado. Na Figura 4.1, pode observar-se a forma como os referidos sensores foram colocados.

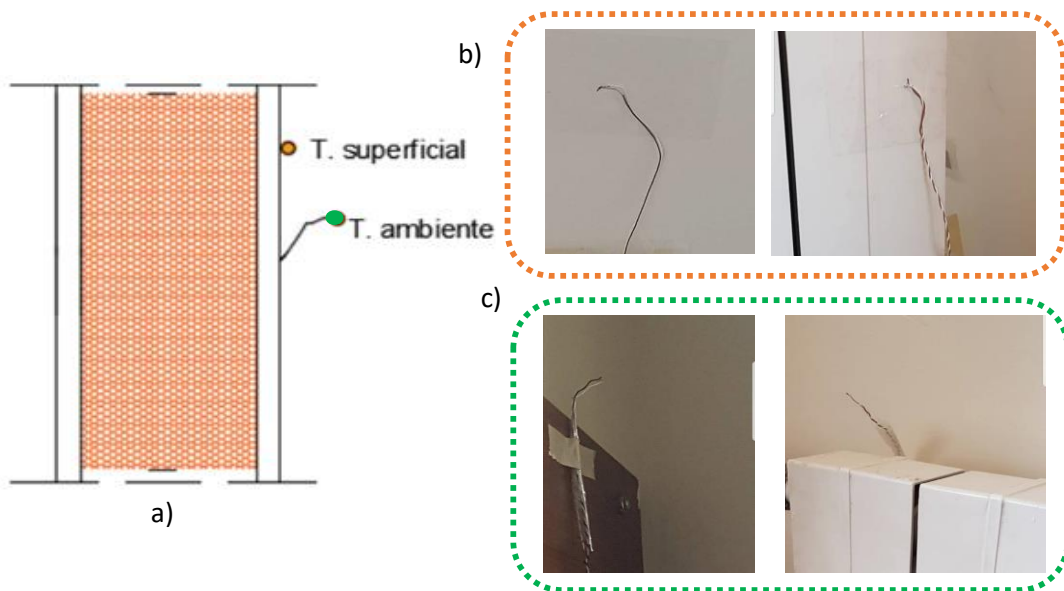


Figura 4.1 - Apresentação esquemática da colocação dos termopares.

A medição do fluxo de calor foi efetuada nos envidraçados e nas paredes, tendo-se recorrido a fluxímetros Hukseflux, e em que se admitiu como positivo o sentido do fluxo do interior para o exterior.

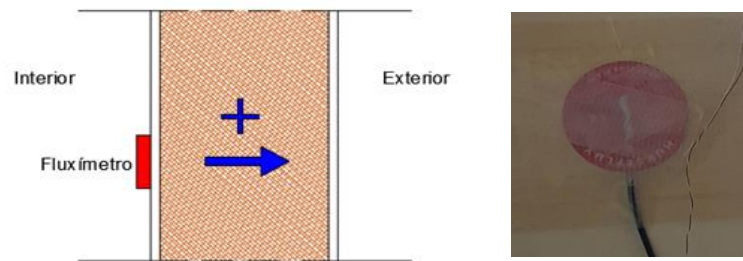


Figura 4.2 - Apresentação esquemática da colocação dos fluxímetros (sentido do fluxo de calor).

Para a medição da radiação e da iluminância, foram utilizados um piranómetro LI-COR LI200 e um luxímetro LI-COR LI210R, respetivamente.

No que respeita à disposição dos sensores, no gabinete de Psicologia, foram utilizados 8 termopares - 2 para a medição da temperatura ambiente interior e exterior, 2 para a medição da temperatura superficial interior e exterior da parede mais fina, 2 para a medição da temperatura superficial interior e exterior da parede mais espessa, 2 para a medição da temperatura superficial do aparelho de climatização e temperatura ambiente próxima deste -, 3 fluxímetros associados ao envidraçado e às duas paredes em análise, um piranómetro, e um luxímetro.

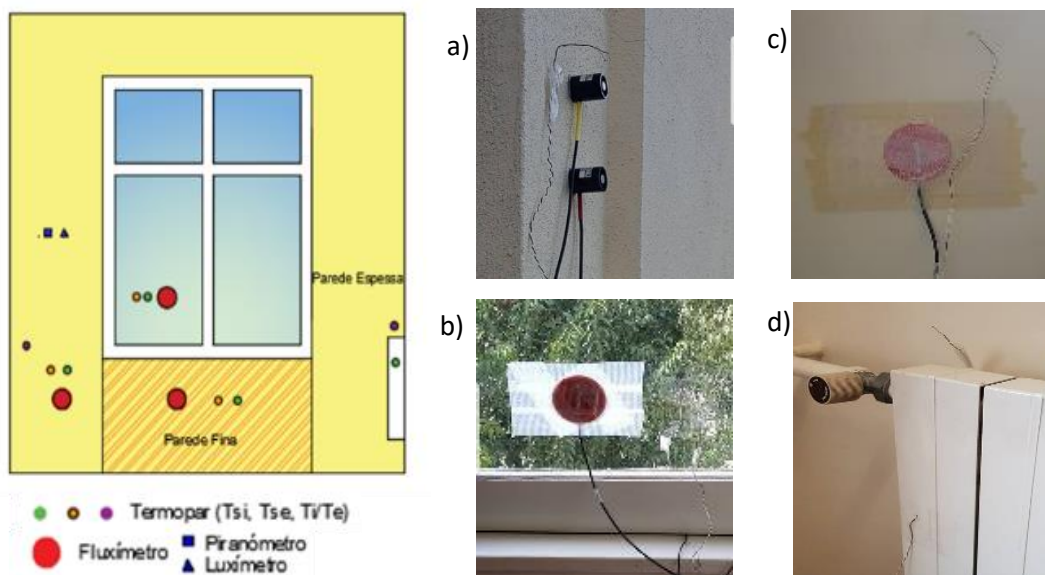


Figura 4.3 - Sensores utilizados nos gabinetes: a) piranómetro LI-COR LI200 (em baixo), luxímetro LI-COR LI210R (em cima) e termopar; b) fluxímetro na superfície interior do vidro; c) fluxímetro e termopar, na superfície interior da parede; d) termopares na superfície e próximo do radiador.

No gabinete de Dermatologia, embora tenha sido seguido o mesmo protocolo de medição com disposição dos sensores semelhante, foram utilizados menos dois termopares e um fluxímetro, pois a parede mais espessa não foi analisada.

Apresenta-se na Tabela 4.1 as características dos sensores utilizados na campanha experimental.

Tabela 4.1 – Características dos equipamentos utilizados.

Sensor	Modelo	Parâmetro medido	Precisão	Localização
Termopares	Tipo "T"	Temperatura	+/- 0.2°C a 100°C	Superfície interior e exterior das paredes e dos envidraçados
Fluxímetros	Hukseflux HFP01	Fluxo de calor	+/- 5%	Superfície interior das paredes e do envidraçado
Piranômetros	LI-COR LI200	Radiação Solar	+/- 5%	Plano perpendicular às fachadas dos gabinetes para medição da radiação horizontal e para medição da radiação vertical (cobertura)
Luxímetros	LI-210R	Iluminância	+/- 5%	Plano perpendicular às fachadas dos gabinetes

Todos os sensores foram conectados aos sistemas de aquisição de dados: Campbell CR10X no gabinete de Psicologia e Delta-T DL2e no gabinete de Dermatologia. A colocação de um aparelho HOBO em cada gabinete permitiu ainda a medição da temperatura ambiente interior, da humidade relativa e da iluminância interior no plano horizontal de trabalho (à cota de 0.90 m).



a)



b)



c)

Figura 4.4 - Sistemas de aquisição de dados: a) Campbell CR10X; b) Delta-T DL2e; c) HOBO.

Feita a colocação em cada gabinete de todos os equipamentos acima referidos, deu-se início à campanha experimental. Todos os sensores efetuaram medições das respetivas variáveis de 10 em 10 min, que uma vez armazenadas nos Logger's de aquisição de dados, foram posteriormente recolhidas em visitas semanais durante toda a campanha.

5. Análise e discussão de resultados experimentais

Neste capítulo, procede-se à análise e discussão dos principais resultados que ilustram o desempenho térmico do edifício quando sujeito a diferentes condições climáticas, dividindo a apresentação pelos períodos correspondentes às condições climáticas de inverno e de verão. Deste modo, apesar da campanha experimental ter sido realizada continuamente entre os dias 23 de fevereiro e 23 de setembro, considera-se para efeitos de análise dois períodos distintos, referentes somente às estações de aquecimento (inverno) e de arrefecimento (verão). Refira-se ainda que, na presente dissertação, apenas os resultados referentes ao comportamento térmico dos gabinetes são analisados.

5.1 Campanha de Inverno

Não tendo sido possível, devido a problemas logísticos, a realização da campanha experimental nos meses mais rigorosos da estação de inverno, esta decorreu entre os dias 23 de fevereiro e 23 de março de 2018, pelo que os dados obtidos correspondem assim ao período final de Inverno e início da meia-estação. De uma amostra relativamente extensa, foram selecionados, para uma análise detalhada, 3 dias tipo representativos do desempenho térmico dos gabinetes durante o período de inverno. Tendo em conta a possível influência do sistema de climatização, os dias representativos foram selecionados com base em situações climáticas distintas, que permitissem aferir o comportamento térmico sob diferentes condições. Deste modo, selecionou-se para análise o dia 23 de fevereiro de 2018 que, sendo um dia de semana em que ambos os gabinetes foram ocupados durante o período laboral, foi o dia mais frio (DMF) e simultaneamente representativo dos dias de maior radiação solar. Por outro lado, considerou-se igualmente interessante a análise de um dia em que ambos os gabinetes não estiveram ocupados, tendo-se procedido à análise do dia 17 de março de 2018, que correspondeu ao dia de menor radiação solar (DmR). Nestes dois dias, os aparelhos de climatização (radiadores murais) estiveram desligados, pelo que, para complementar o estudo e a fim de averiguar a influência do sistema de climatização nas condições térmicas dos gabinetes, foi ainda selecionado o dia 27 de fevereiro de 2018 (DAQ), em que ambos os gabinetes estiveram climatizados.

5.1.1 Temperaturas e Radiação

Na Figura 5.1, para os três dias em análise, apresentam-se as temperaturas exterior (T_e), interior (T_i) e superficiais (T_{si} e T_{se}) medidas nas paredes de cada um dos gabinetes, bem como a radiação global exterior medida no plano vertical ($Rad_{v,e}$) das fachadas dos respetivos gabinetes.

Observa-se que nos três dias em análise, em ambos os gabinetes: i) a radiação solar influencia diretamente todas as temperaturas registadas, ou seja, se por um lado o aumento da radiação solar conduz ao aumento de todas as temperaturas, por outro, súbitas quebras da radiação - devido a nebulosidade passageira e ao sombreamento causado pelas árvores - provoca também reduções acentuadas das temperaturas superficiais e ambiente interior; ii) a temperatura ambiente interior mantém-se sempre superior à temperatura exterior; iii) nos períodos do dia sem radiação, a temperatura superficial exterior das paredes ajusta-se à temperatura exterior; iv) a temperatura superficial interior da parede fina varia de forma semelhante, nos dois gabinetes, dependendo das condições térmicas do dia; v) à exceção dos períodos de maior radiação solar, a temperatura superficial interior é consideravelmente superior à temperatura superficial exterior nas paredes em análise.

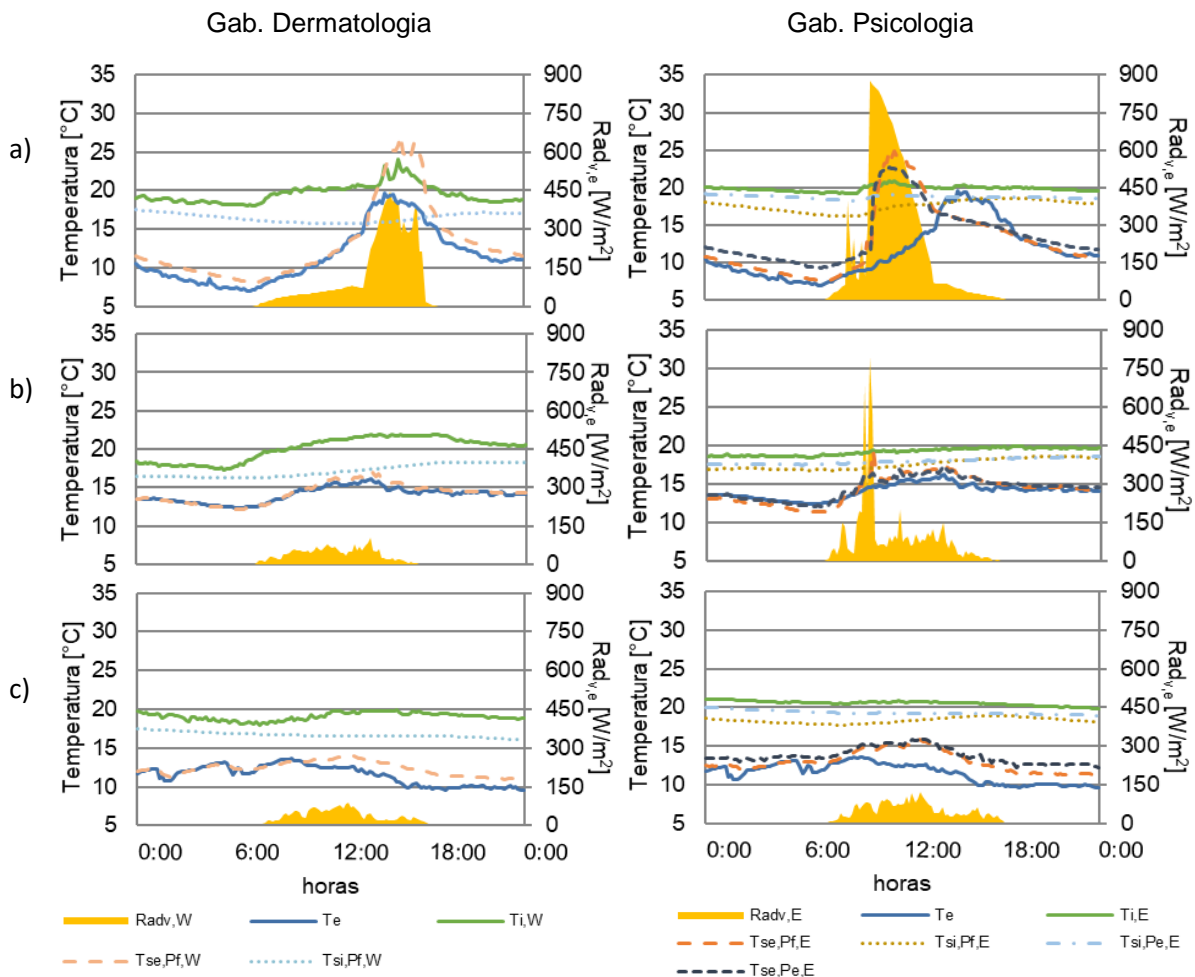


Figura 5.1 - Temperaturas: a) Dia mais frio (DMF); b) Dia com climatização (DAQ); c) Dia de menor radiação solar (DmR).

Relativamente ao DMF (Figura 5.1 a), é de salientar a forte influência da radiação solar nas temperaturas superficiais exteriores. Nos momentos em que foram registados os valores de maior radiação solar, constata-se que: i) as temperaturas superficiais exteriores medidas nas paredes de ambos os gabinetes

aumentaram significativamente; ii) em todas as paredes em análise, a temperatura superficial exterior é, simultaneamente, superior à respetiva temperatura superficial interior e à temperatura interior do gabinete; iii) a temperatura superficial exterior da parede fina é superior à temperatura superficial exterior da parede espessa e o inverso ocorre relativamente as temperaturas superficiais interiores; iv) verifica-se também que ambas as temperaturas superficiais da parede fina respondem mais rapidamente às variações das solicitações térmicas exteriores (temperatura e radiação solar exterior) do que as da parede espessa, o que pode estar relacionado com a menor massa térmica da parede fina.

No DAQ (Figura 5.1 b), ambos os gabinetes estiveram sob a influência do calor gerado pelo aparelho de climatização, que esteve ligado das 6h00 às 19h00. Embora não esteja representado graficamente, a temperatura superficial registada na superfície do radiador mural, ao longo do período de funcionamento, oscilou entre 45 e 50°C no gabinete de Psicologia e entre 55 e 60°C no gabinete de Dermatologia. Ainda que a influência do calor gerado pelo aparelho sobre o ambiente térmico dos gabinetes não seja evidente, nota-se que a temperatura interior tende a aumentar progressivamente ao longo do dia, a partir do momento em que aquele é ligado (6h). Tal facto é mais visível no gabinete de Dermatologia devido à gama superior de valores em que a temperatura do radiador oscilou. Embora com menor expressão, a temperatura superficial interior registada na parede fina do gabinete de Dermatologia e a temperatura superficial interior registada nas paredes fina e espessa do gabinete de Psicologia também aumentaram.

No que diz respeito ao DmR (Figura 5.1 c), observa-se que as temperaturas, quer interior quer superficial interior, medidas nas paredes fina e espessa do gabinete de Psicologia, são ligeiramente superiores quando comparadas com a temperatura interior do gabinete de Dermatologia e a temperatura superficial interior medida na parede fina deste. O facto de no dia anterior (16 de março de 2018), o gabinete de Psicologia ter estado sujeito a uma radiação solar no plano vertical da fachada superior (em média, cerca de 40 W/m²) à do gabinete de Dermatologia, que conduziu ao aumento de todas as temperaturas interiores neste gabinete, pode justificar esta diferença. Analisando as temperaturas superficiais interiores medidas nas paredes do gabinete de Psicologia, nota-se que a temperatura na parede fina é inferior à temperatura medida na parede espessa, nas primeiras horas do dia. A parede fina, com menor massa térmica e por isso com menor capacidade de armazenamento de calor, tende a ter, para um mesmo período de tempo, uma perda de calor superior à da parede espessa. Por outro lado, a parede fina aquece mais rapidamente, pelo que, após a influência da radiação solar, a sua temperatura superficial interior tende a ajustar-se à da parede espessa nas restantes horas do dia.

As temperaturas superficiais exterior e interior medidas nos envidraçados, embora não estejam representadas, evidenciam o estado de degradação e reduzida eficiência energética dos mesmos. Em todos os dias da campanha a temperatura superficial interior do vidro ajustou-se quase de forma perfeita à sua temperatura superficial exterior. A maior variação registada entre as mesmas foi de 0.5°C.

Apresenta-se nas Tabelas 5.1, 5.2 e 5.3, os valores médios, máximos e mínimos das temperaturas exterior, interior e superficiais exterior e interior das paredes e ainda a radiação global exterior medidas em ambos os gabinetes, para os dias selecionados.

Tabela 5.1 - Valores médios, máximos e mínimos das temperaturas exterior (T_e) e interior (T_i), superficiais exterior (T_{se}) e interior (T_{si}) das paredes e radiação global vertical exterior, no DMF.

	Gab. Psicologia							Gab. Dermatologia				
	Parede Espessa			Parede Fina				Parede Fina				
	T_e [°C]	T_{se} [°C]	T_{si} [°C]	T_{se} [°C]	T_{si} [°C]	T_i [°C]	$Rad_{v,e}$ [W/m ²]	T_e [°C]	T_{se} [°C]	T_{si} [°C]	T_i [°C]	$Rad_{v,e}$ [W/m ²]
<i>Média</i>	11.0	12.2	18.7	11.4	17.7	19.9	71.5	10.9	11.6	16.5	19.3	65.8
<i>Máx.</i>	16.9	22.6	19.2	25.0	18.6	20.9	876.0	19.6	27.0	17.5	22.6	448.0
<i>Mín.</i>	6.4	12.1	18.3	7.6	16.2	19.2	0	6.9	8.2	15.8	18.0	0

Tabela 5.2 - Valores médios, máximos e mínimos das temperaturas exterior (T_e) e interior (T_i), superficiais exterior (T_{se}) e interior (T_{si}) das paredes e radiação global vertical exterior, no DmR.

	Gab. Psicologia							Gab. Dermatologia				
	Parede Espessa			Parede Fina				Parede Fina				
	T_e [°C]	T_{se} [°C]	T_{si} [°C]	T_{se} [°C]	T_{si} [°C]	T_i [°C]	$Rad_{v,e}$ [W/m ²]	T_e [°C]	T_{se} [°C]	T_{si} [°C]	T_i [°C]	$Rad_{v,e}$ [W/m ²]
<i>Média</i>	12.1	13.5	19.3	12.9	18.3	20.6	40.0	11.9	12.3	16.6	19.2	32.7
<i>Máx.</i>	14.1	16.1	20.0	15.8	18.9	21.1	122.1	13.7	14.0	17.5	19.9	89.2
<i>Mín.</i>	9.1	12.3	19.0	11.2	17.7	19.8	0	10.8	10.8	16.1	18.0	0

Tabela 5.3 - Valores médios, máximos e mínimos das temperaturas exterior (T_e) e interior (T_i), superficiais exterior (T_{se}) e interior (T_{si}) das paredes e radiação global vertical exterior, no DAQ.

	Gab. Psicologia							Gab. Dermatologia				
	Parede Espessa			Parede Fina				Parede Fina				
	T_e [°C]	T_{se} [°C]	T_{si} [°C]	T_{se} [°C]	T_{si} [°C]	T_i [°C]	$Rad_{v,e}$ [W/m ²]	T_e [°C]	T_{se} [°C]	T_{si} [°C]	T_i [°C]	$Rad_{v,e}$ [W/m ²]
<i>Média</i>	14.4	14.8	17.9	14.5	17.4	19.3	63.5	14.2	14.5	16.9	20.6	41.1
<i>Máx.</i>	17.8	17.3	18.5	19.4	18.5	19.9	788.0	16.2	17.3	18.4	22.0	103.9
<i>Mín.</i>	12.0	12.1	17.5	11.4	16.8	18.3	0	12.4	12.2	16.2	17.3	0

Tabela 5.4 - Valores médios, máximos e mínimos das temperatura superficial (T_{SAQ}) do aparelho de climatização e temperatura do ar (T_{arAQ}) próxima deste, no DAQ.

	Gab. Psicologia		Gab. Dermatologia	
	Climatização		Climatização	
	T_{SAQ} [°C]	T_{arAQ} [°C]	T_{SAQ} [°C]	T_{arAQ} [°C]
<i>Média</i>	39.1	30.2	53.9	26.0
<i>Máx.</i>	50.2	40.3	61.0	31.0
<i>Mín.</i>	18.7	18.7	19.0	17.6

5.1.2 Fluxos de calor

De seguida, analisa-se os fluxos de calor medidos nos envidraçados e nas paredes de cada gabinete, correspondentes aos três dias representativos em análise. Tendo em conta a forma como o fluxímetro foi colocado na superfície interior de cada elemento, em rigor avalia-se nesta campanha o fluxo entre a superfície interior de cada elemento e o ambiente interior do gabinete, assumindo como positivo o sentido do fluxo de calor do interior para o exterior. Deste modo, quanto maior for a diferença entre a temperatura superficial interior do elemento e a temperatura interior do gabinete, maior será o fluxo de calor na interface. Ressalva-se ainda o facto de o fluxo medido nos envidraçados por esta via experimental só ter representatividade durante o período noturno. Durante o dia, a radiação solar sobre o fluxímetro é em parte absorvida por ele, elevando a sua temperatura a valores diferentes dos registados nos vidros, pelo que os fluxos de calor medidos não correspondem aos que na verdade acontecem nos envidraçados [31]. Por esta razão e para a análise, apenas se apresentam os resultados para o período noturno.

Nas Figuras 5.2 a), 5.2 b) e 5.2 c), são apresentados: i) os fluxos medidos no envidraçado (Env) e na parede fina (Pf) do gabinete de Dermatologia; ii) os fluxos medidos no envidraçado e nas paredes fina (Pf) e espessa (Pe) do consultório de Psicologia; iii) a radiação vertical exterior medida nos dias selecionados para análise, em cada gabinete.

Nos dias em análise (DMF, DAQ e DmR), é possível observar que: i) todos os fluxos medidos em cada elemento dos dois gabinetes são sempre positivos, pelo que o fluxo de calor foi sempre no sentido do interior para o exterior; ii) nos períodos do dia sem radiação solar, todos os fluxos medidos nas paredes de ambos os gabinetes tenderam para uma gama semelhante de valores; iii) no gabinete de Psicologia, após o período de radiação solar, o fluxo medido na parede espessa tende a ser ligeiramente superior ao da parede fina devido ao efeito de inércia térmica, que retarda a libertação do calor acumulado na massa.

No que diz respeito ao DMF (sexta-feira), referente às paredes analisadas no gabinete de Psicologia, observa-se que o fluxo medido em ambas as paredes aumenta no período de maior radiação solar. Tal

facto deve-se à maior discrepância entre as temperaturas superficiais interiores das paredes e a temperatura interior do gabinete, que no referido período aumenta ligeiramente. Comparando os fluxos de calor nas paredes finas de cada gabinete, constata-se que ao invés do que acontece no gabinete de Psicologia, onde nas horas de menor radiação solar o fluxo tende a diminuir, no gabinete de Dermatologia o fluxo aumentou. O facto de o gabinete de Dermatologia estar ocupado maioritariamente de manhã, juntamente com a possível influência do calor, proveniente dos radiadores do espaço comum do edifício, na temperatura interior do gabinete, pode justificar esta diferença.

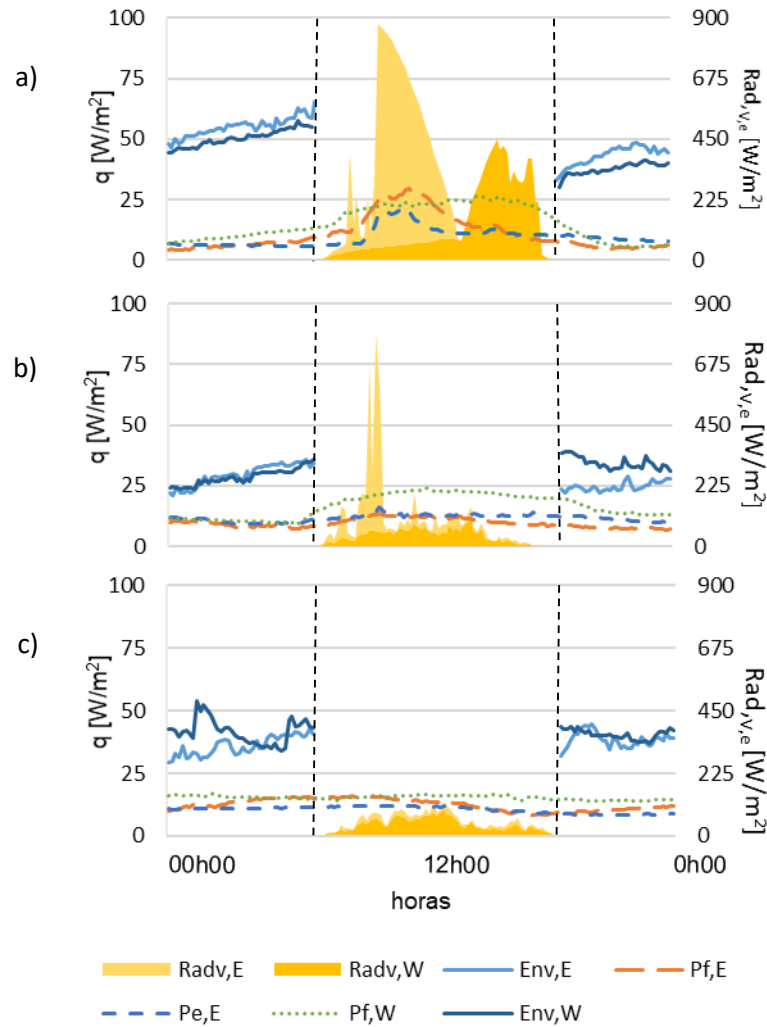


Figura 5.2 - Fluxos de Calor: a) Dia mais Frio (DMF); b) Dia com climatização (DAQ); c) Dia com menor radiação solar (DmR).

Relativamente ao DAQ (que correspondeu a um dia de trabalho, terça-feira), constata-se a influência do calor gerado pelo aparelho de climatização, mais expressiva no gabinete de Dermatologia tendo em conta as temperaturas atingidas por este. Com efeito, a gama de valores da temperatura interior atingida neste gabinete, durante o período de funcionamento do aparelho de climatização, conduziu a uma maior

discrepância entre a temperatura ambiente interior e a temperatura superficial interior da parede fina. Consequentemente, o fluxo medido nesta parede do gabinete de Dermatologia foi superior, quando comparado ao fluxo da parede fina do gabinete de Psicologia, onde a diferença entre a temperatura ambiente interior e a temperatura superficial interior foi menor. Por sua vez, o fluxo medido na parede espessa do gabinete de Psicologia é semelhante em grande parte do dia ao fluxo medido na parede fina. Nas últimas horas do dia é ligeiramente superior devido ao efeito de inércia térmica.

No que se refere ao DmR (sábado), dia em que os gabinetes não foram ocupados e a radiação solar, pelo facto do dia ter sido de céu encoberto, não produziu grande efeito na temperatura interior de ambos os gabinetes, não há observações relevantes a acrescentar. À exceção de um período de tempo, após as horas de maior radiação solar, em que o fluxo na parede fina do gabinete de Dermatologia foi superior ao fluxo medido na parede fina do gabinete de Psicologia, os fluxos de todas as paredes variaram de forma semelhante, registando-se valores da mesma ordem de grandeza na maior parte do dia em ambos os gabinetes. No que respeita aos envidraçados, os fluxos evidenciam o reduzido desempenho térmico e estado de conservação dos elementos. Note-se que em ambos os dias os fluxos são relativamente elevados, traduzindo-se numa perda de calor do interior para o exterior considerável.

5.1.3 Coeficientes de transmissão térmica

O coeficiente de transmissão térmica (U) é um importante parâmetro de avaliação do desempenho térmico dos elementos que constituem a envolvente de um edifício. Relacionando o fluxo de calor através de um elemento construtivo com a diferença de temperaturas entre os ambientes de separação, o referido coeficiente permite antever de forma expedita se o elemento é passível de uma maior ou menor capacidade de transferência de calor. Com efeito, a um maior valor de U corresponderá um menor desempenho térmico do elemento.

Como importante indicador do desempenho térmico da envolvente de um edifício, o coeficiente de transmissão térmica está regulamentado de acordo com o elemento construtivo e para cada zona climática, isto é, para cada tipo de elemento - parede, cobertura, pavimento - considerando o clima do local do edifício, está estabelecido um valor máximo para este coeficiente. Refira-se ainda a este respeito que a regulamentação térmica e energética tem vindo a impor valores para este tipo de coeficiente cada vez mais exigentes de modo a limitar as trocas de calor pela envolvente e assim conduzir a poupanças energéticas nos edifícios para manter condições de conforto térmico interior.

Deste modo, para melhor caracterizar o comportamento térmico da envolvente, pretende-se neste subcapítulo estimar o valor do coeficiente de transmissão térmica para as paredes do gabinete de Psicologia em análise. Para o efeito, foi utilizado o método da média progressiva preconizado na norma EN ISO 9869:1994. Segundo este método, o coeficiente de transmissão térmica, calculado pela fórmula

abaixo apresentada, relaciona o fluxo de calor medido (q) com as correspondentes temperaturas superficiais exteriores e interiores (T_{se} e T_{si}) medidas e as resistências térmicas superficiais exterior e interior (R_{se} e R_{si}) [32].

$$U = \frac{1}{\frac{\sum_{j=1}^n T_{si_j} - \sum_{j=1}^n T_{se_j}}{\sum_{j=1}^n q_j} + R_{si} + R_{se}} \quad [W/m^2\text{°C}] \quad (5.1)$$

Deste modo, a partir dos valores de temperatura superficial interior (T_{si}) e exterior (T_{se}) e dos correspondentes fluxos de calor (q) medidos durante um período de 13 dias (com intervalos de medição de 10 minutos), referentes ao gabinete de Psicologia, obteve-se uma estimativa do coeficiente de transmissão térmica para a parede fina (U_{Pf}) e para a parede espessa (U_{Pe}).

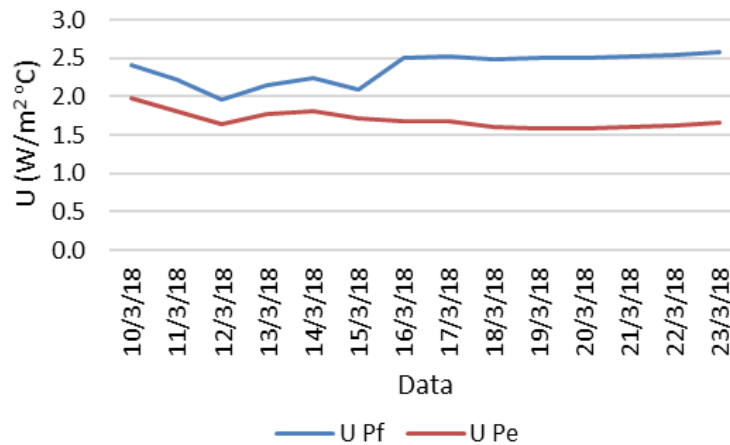


Figura 5.3 - Coeficiente de transmissão térmica das paredes fina (U_{Pf}) e espessa (U_{Pe}) do gabinete de psicologia.

Como se pode observar na Figura 5.3, após um período inicial onde é visível um comportamento não estacionário, as medições estabilizam. Com efeito, o valor de U tende para $2.5 \text{ W/m}^2\text{°C}$ no caso da parede fina, e para $1.65 \text{ W/m}^2\text{°C}$ no caso da parede espessa, o que confirma a menor resistência térmica da parede fina tendo em conta as espessuras e os materiais utilizados na construção de ambas as paredes. Estes valores são próximos dos valores preconizados na literatura para as soluções construtivas em causa - $U=2.4 \text{ W/m}^2\text{°C}$ para alvenaria de tijolo maciço ($e=0.25\text{m}$) [33] e $1.8 \text{ W/m}^2\text{°C}$ para alvenaria de pedra ordinária ($e=0.40$ a 0.60m) [34]. Verifica-se também que na maior parte do tempo da campanha os fluxos de calor associados à parede fina são superiores aos da parede espessa, como a relação de grandeza dos coeficientes de transmissão térmica deduzidos permitia antever.

5.1.4 Análise em frequência

A análise de observações sobre variáveis temporais de comportamento aleatório procura, sempre que possível, identificar ou reconhecer padrões e intensidades que permitam a sua melhor caracterização para o tipo de estudo pretendido. A simples análise visual da representação gráfica dos dados, sobretudo para períodos de tempo longos e frequências de amostragem elevadas, não permite, em geral, efetuar aquele reconhecimento de forma eficaz, pelo que ganham especial importância todas as ferramentas e métodos matemáticos que permitam analisar e interpretar a informação contida nas amostras recolhidas sobre o comportamento das variáveis. Neste aspeto, a transformada de Fourier discreta (DFT) [35] pode desempenhar um papel importante por permitir decompor o sinal da variável num conjunto de funções sinusoidais (harmónicas), cada uma com a sua frequência, fase e amplitude, cuja soma recompõe o sinal original. A técnica permite transformar um sinal no domínio do tempo para uma função no domínio da frequência e assim identificar periodicidades de comportamento e influências dominantes no desenvolvimento dos fenómenos. Uma das aplicações mais interessantes da DFT é na análise de séries temporais, que constituem sequências de observações feitas em intervalos de tempo iguais, como são aquelas que foram realizadas nos gabinetes de psicologia e dermatologia do IPO de Lisboa, referentes a temperaturas, radiação solar e fluxos de calor. Todas estas categorias de dados, recolhidos com o equipamento de aquisição descrito anteriormente, representam sinais discretos no tempo cujo espectro de frequência pode ser obtido por aplicação da DFT [35].

Os fundamentos matemáticos da DFT e o algoritmo da sua implementação prática encontram-se amplamente descritos na literatura da especialidade [36], pelo que na presente dissertação apresenta-se apenas a equação base da transformada, na qual este estudo se apoiou, e a definição dos parâmetros que a compõem. Se N for o número de amostras recolhidas de uma função g e g_k for o valor que a função toma para a amostra k , a transformada de Fourier discreta da função assume a seguinte forma:

$$G_n = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} g_k e^{-jk\frac{2\pi n}{N}} \quad (n=0, \dots, N-1) \quad (5.2)$$

em que G_n é um sinal harmónico complexo, cuja amplitude e fase são obtidos a partir da parte real (Re) e imaginária (Im) de G_n através das relações:

$$|G_n| = \sqrt{Re(G_n)^2 + Im(G_n)^2} \quad \phi_n = \tan^{-1} \left[\frac{Im(G_n)}{Re(G_n)} \right] \quad (5.3)$$

Tal como acontece com o tempo, também a frequência do sinal é discreta com N componentes ($n=0 \dots N-1$). Se T_a for o tempo de aquisição de cada amostra, então a menor frequência que pode ser identificada é $f_1=1/T_a$ (frequência fundamental) e as restantes frequências do espectro serão obtidas por $f_n=n/T_a$.

O método da DFT foi aplicado ao caso de estudo para a temperatura exterior e temperatura ambiente do gabinete de psicologia. Ambos os sinais, registados com um intervalo temporal de 10 minutos durante um período de aproximadamente um mês, apresentam-se na Figura 5.4 a). Observa-se que os sinais são muito

irregulares, e apresentam uma maior amplitude no caso da temperatura exterior (T_e). As flutuações registadas indiciam eventuais periodicidades na evolução das temperaturas ao longo do tempo, pelo que para uma análise mais rigorosa e fundamentada da ocorrência de periodicidades dos registos das temperaturas, apresenta-se na Figura 5.4 b) o espectro de frequência dos dois conjuntos de registos.

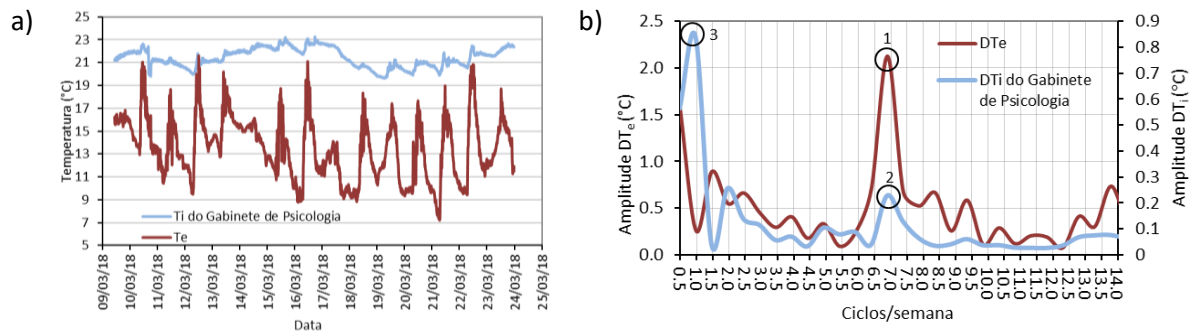


Figura 5.4 - a) Temperaturas ambiente exterior (T_e) e interior (T_i) do Gabinete de Psicologia e; b) frequências e amplitudes (D_{T_e} e D_{T_i}) por aplicação da TF entre 9 e 24 de março de 2018.

Da observação de Figura 5.4 b), pode retirar-se que: a) a harmónica de T_e com maior peso nos valores registados (maior D_{T_e} - pico 1) é a que tem o período de 1 dia (7 ciclos/semana), o que corresponde ao ciclo diário dia/noite, como seria de esperar; b) a harmónica de T_i acusa naturalmente o efeito de T_e , para a mesma frequência de T_e mas com um valor bastante amortecido (pico 2), o que é indicativo do efeito de inércia térmica e de climatização do espaço (que tende a estabilizar a temperatura); c) o aparelho de climatização é desligado ao fim de semana, o que fica bem visível pela harmónica com período de uma semana (1 ciclo/semana), assinalada pelo pico 3, o que corresponde à realidade observada, sendo este sem dúvida um dos resultados mais interessantes desta análise.

5.2 Campanha de verão

A campanha de Verão decorreu entre os dias 20 de junho de 23 de setembro. Para caracterizar melhor o desempenho do edifício durante esta estação mais quente do ano, optou-se por seguir a mesma metodologia adotada na campanha de inverno, seleccionando para efeitos de análise os dias representativos desta extensa recolha de resultados. Desta feita, seleccionou-se para análise o dia 25 de julho correspondente ao dia de menor radiação solar (D_{mR}) e o dia 30 de agosto que, sendo o dia de maior radiação solar, é simultaneamente representativo dos dias mais quentes registados durante a campanha. Salieta-se ainda, que ao invés do que sucedeu na campanha de inverno, pelo facto de ambos os gabinetes não serem dotados de nenhum aparelho de climatização que possa ser usado para efeitos de arrefecimento, não é analisado nenhum dia em que os gabinetes se encontrem sob influência de sistemas climatização.

5.2.1 Temperaturas e radiação solar

Embora numa gama distinta de valores, observa-se na campanha de verão alguns registos de temperatura e radiação solar semelhantes aos verificados na estação de inverno. Mais uma vez, nos dois dias em análise, em ambos os gabinetes: i) constata-se o efeito da radiação solar em todas as temperaturas onde, em correspondência com o aumento da radiação solar, se verifica um aumento de todas as temperaturas ao passo que, com as súbitas quedas de radiação solar se regista reduções acentuadas das temperaturas superficiais e ambiente interior; ii) tanto a temperatura interior como as temperaturas superficiais das paredes em análise variam de forma semelhante, dependendo das condições térmicas do dia; iii) à exceção dos períodos de maior radiação solar, a temperatura superficial interior é consideravelmente superior à temperatura superficial exterior nas paredes em análise; iv) nos períodos do dia sem radiação, a temperatura superficial exterior das paredes ajusta-se à temperatura exterior.

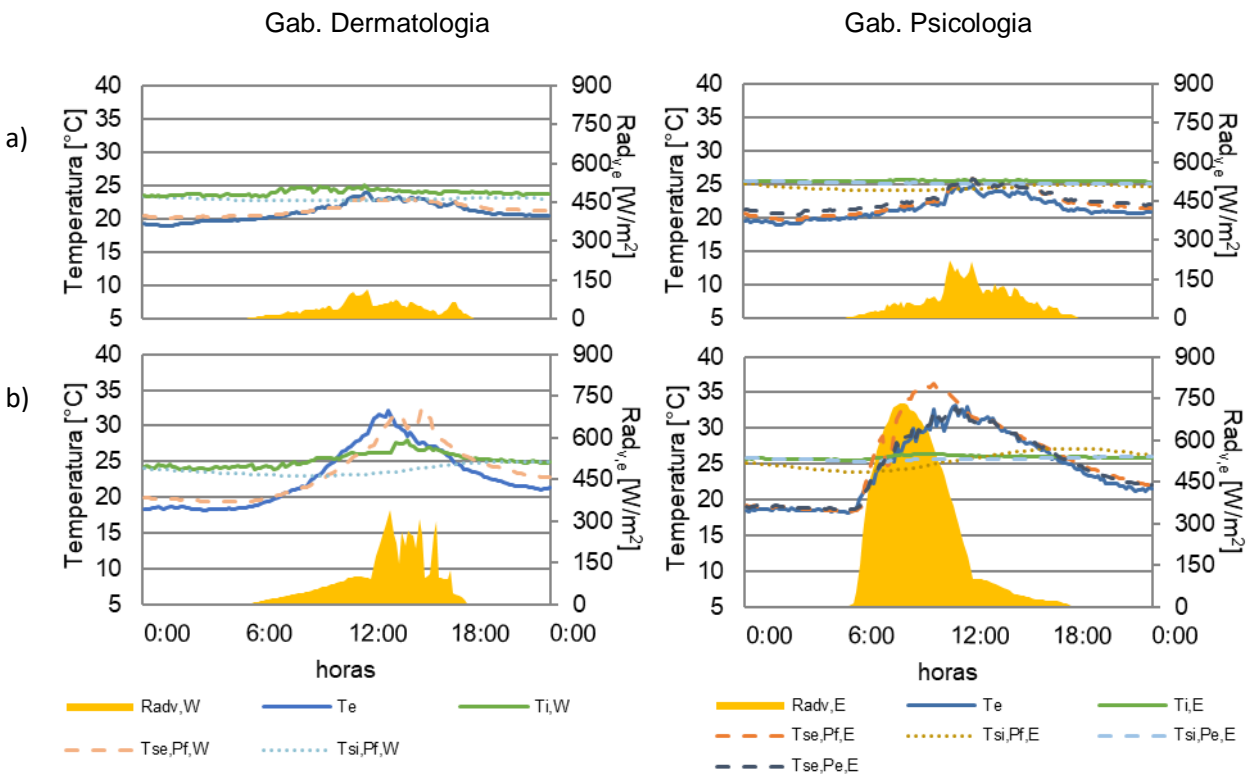


Figura 5.5 - Temperaturas: a) Dia de menor radiação solar (DmR); b) Dia de maior radiação solar (DMR).

No DmR, é visível um comportamento térmico idêntico em ambos os gabinetes. Observando os resultados obtidos para este dia, constata-se que em correspondência com a radiação solar o andamento de todas as temperaturas registadas é semelhante nos dois gabinetes. As temperaturas interior e superficial interior da parede fina do gabinete de Dermatologia são ligeiramente inferiores às registadas na parede fina do gabinete de Psicologia. Note-se que só nos picos de maior radiação solar a temperatura ambiente do

gabinete de Dermatologia atinge valores semelhantes à temperatura ambiente do gabinete de Psicologia, que por sua vez se manteve constante acima de 25°C ao longo de todo o dia. O facto de a radiação solar registada no plano vertical da fachada deste gabinete ter sido, em termos médios, cerca de 30 W/m² superior à registada no gabinete de Dermatologia, poderá justificar esta diferença. Por outro lado, presume-se que a diferença entre as referidas temperaturas se deva também ao efeito exercido pela radiação solar do dia anterior. À semelhança do verificado na análise do DmR da campanha de Inverno, também no dia que antecedeu o DmR da estação de verão, a diferença entre a radiação solar registada em ambas as fachadas foi bastante considerável, tendo sido superior, em cerca de 45 W/m², no gabinete de Psicologia. Consequentemente, nas primeiras horas do dia a temperatura interior no gabinete de Psicologia foi, em média, superior em cerca de 1.5°C. No que se refere às temperaturas superficiais registadas nas paredes do gabinete de Psicologia observa-se que, à exceção do período de insolação, em que as temperaturas superficiais exteriores registadas em ambas as paredes tendem a ajustar-se, tanto a temperatura superficial exterior como a temperatura superficial interior da parede espessa são ligeiramente superiores quando comparadas, respetivamente, com as temperaturas superficiais exterior e interior da parede fina. Como referido, tal facto deve-se à maior massa térmica da parede espessa. Se por um lado a parede espessa quando sujeita ao efeito da radiação solar aquece mais lentamente, por outro, tendo uma maior capacidade de armazenamento de calor, para um mesmo período de tempo, tem uma reposição do calor acumulado mais prolongada, traduzida por maior demora no abaixamento das suas temperaturas superficiais, quando comparada com a parede fina.

Relativamente ao DMR, é notável a diferença entre a radiação solar registada nas fachadas dos gabinetes e o efeito que produziram no andamento de todas as temperaturas registadas. No que diz respeito à temperatura interior dos gabinetes, é interessante observar que, ao invés do que acontece no gabinete de Dermatologia, a temperatura interior no gabinete de Psicologia não sofreu um aumento significativo após o maior pico de radiação solar. Apesar de, em termos médios, a temperatura ambiente no gabinete de Psicologia ser cerca de 1°C superior à do gabinete de Dermatologia, seria de esperar que em correspondência com a radiação solar registada, a temperatura de pico mais elevada tivesse sido atingida no gabinete de Psicologia e não no gabinete de Dermatologia. Embora durante toda a campanha se tenha tentado manter sempre a mesma posição dos estores, a operação dos dispositivos de sombreamento por parte dos ocupantes, causando por vezes o sombreamento total da janela do gabinete de Psicologia poderá, eventualmente, explicar o sucedido neste dia. No que diz respeito à temperatura superficial interior da parede fina, apesar de o seu andamento ser semelhante em ambos os gabinetes, observa-se que, em resposta à maior radiação solar registada, a temperatura superficial interior na parede fina do gabinete de Psicologia é consideravelmente superior à temperatura superficial interior na parede fina do gabinete de Dermatologia, nas últimas horas do dia. Como se pode constatar, durante o referido período, a temperatura superficial interior da parede fina do gabinete de Psicologia chega mesmo a valores superiores à temperatura ambiente interior, o que provocou um fluxo de calor negativo como se descreverá no capítulo seguinte. No que respeita às temperaturas superficiais exteriores das paredes em análise, salienta-se a

forte influência da radiação solar. Com efeito, no período do dia em que a incidência do sol na fachada é mais rigorosa, a temperatura superficial exterior da parede fina de ambos os gabinetes é superior a todas as temperaturas registadas. Relativamente aos registos da parede espessa do gabinete de Psicologia, verifica-se que a temperatura superficial exterior, ajustando-se à temperatura exterior durante todo o dia, é consideravelmente inferior à temperatura superficial exterior da parede fina no período de maior radiação solar. Como já foi referido anteriormente, tendo em conta a menor massa térmica da parede fina, o facto de as temperaturas superficiais desta responderem mais rapidamente às variações das solicitações térmicas exteriores (temperatura e radiação solar exterior) do que as da parede espessa, poderá justificar esta diferença.

Salienta-se ainda que nos dias em análise, embora a temperatura interior tenha variado, em termos médios, entre 24 e 25°C em ambos os gabinetes, atingiu valores que, ultrapassando 25°C, se revelam, de acordo com a literatura, inadequados para o ambiente térmico em causa.

À semelhança do referido na campanha de inverno, também na campanha de verão as temperaturas superficiais exterior e interior medidas nos envidraçados, embora não estejam representadas, evidenciam o estado de degradação e reduzida eficiência energética dos mesmos. Em todos os dias da campanha a temperatura superficial interior do vidro ajustou-se quase de forma perfeita à sua temperatura superficial exterior.

Apresenta-se, nas Tabelas 5.5 e 5.6, os valores médios, máximos e mínimos das temperaturas exterior, interior e superficiais exterior e interior das paredes e ainda a radiação global exterior medidas em ambos os gabinetes, para os dias seleccionados.

Tabela 5.5- Valores médios, máximos e mínimos das temperaturas exterior (T_e) e interior (T_i), superficiais exterior (T_{se}) e interior (T_{si}) das paredes e radiação global vertical exterior, no DmR.

	Gab. Psicologia							Gab. Dermatologia				
	Parede Espessa			Parede Fina				Parede Fina				
	T_e [°C]	T_{se} [°C]	T_{si} [°C]	T_{se} [°C]	T_{si} [°C]	T_i [°C]	$Rad_{V,e}$ [W/m ²]	T_e [°C]	T_{se} [°C]	T_{si} [°C]	T_i [°C]	$Rad_{V,e}$ [W/m ²]
<i>Média</i>	21.1	22.3	25.1	21.8	24.5	25.5	52.7	20.8	21.3	23.0	23.9	33.5
<i>Máx.</i>	24.9	25.9	25.9	25.9	25.1	25.7	222.2	24.0	23.3	23.3	25.0	112.1
<i>Mín.</i>	19.0	20.5	25.1	19.6	24.1	25.4	0	19.0	20.2	22.7	23.3	0

Tabela 5.6 - Valores médios, máximos e mínimos das temperaturas exterior (T_e) e interior (T_i), superficiais exterior (T_{se}) e interior (T_{si}) das paredes e radiação global vertical exterior, no DMR.

	Gab. Psicologia							Gab. Dermatologia				
	Parede Espessa			Parede Fina				Parede Fina				
	T_e [°C]	T_{se} [°C]	T_{si} [°C]	T_{se} [°C]	T_{si} [°C]	T_i [°C]	$Rad_{V,e}$ [W/m ²]	T_e [°C]	T_{se} [°C]	T_{si} [°C]	T_i [°C]	$Rad_{V,e}$ [W/m ²]
<i>Média</i>	24.1	24.6	25.7	25.0	25.4	25.9	99.1	23.1	21.8	23.6	25.1	72.7
<i>Máx.</i>	33.2	32.9	26.0	36.3	27.2	26.4	733.0	32.1	32.5	25.0	28.0	338.7
<i>Mín.</i>	18.1	18.4	25.4	18.2	23.8	25.5	0	18.2	19.4	23.0	23.9	0

5.2.2 Fluxos de calor

Recorde-se que, tendo em conta a forma como o fluxímetro foi colocado na superfície interior de cada elemento, avalia-se o fluxo entre a superfície interior de cada elemento e o ambiente interior do gabinete, assumindo como positivo o sentido do fluxo de calor do interior para o exterior. A campanha de verão é marcada por alguns períodos onde o fluxo de calor é negativo, o que acontece sempre que a temperatura superficial interior do elemento é superior à temperatura ambiente interior no gabinete. Neste caso, quanto maior for a discrepância entre as referidas temperaturas, mais negativo será o fluxo de calor na interface. Naturalmente, no momento ou período de tempo em que a temperatura interior do gabinete é igual à temperatura superficial interior do elemento o fluxo de calor será nulo.

Na Figura 5.6, estão representados os valores do fluxo de calor bem como a radiação global exterior, para os dias DmR e DMR. Refira-se que devido a uma avaria do sensor, o fluxo de calor através da parede fina do gabinete de Dermatologia não foi avaliado na estação de verão.

No que diz respeito ao DmR, os fluxos de calor das paredes em análise variaram de forma semelhante, registando-se valores da mesma ordem de grandeza na maior parte do dia. A menor radiação solar que caracteriza o dia em análise conduziu a uma menor variação da temperatura ambiente interior e, por consequência, a fluxos de calor reduzidos ao longo do dia. Note-se que só no período de maior radiação solar o fluxo de calor em ambas as paredes varia, sendo o da parede espessa ligeiramente inferior ao da parede fina. Relativamente ao fluxo através desta parede, importa ainda referir que o facto de este ser negativo nas primeiras horas do dia se deve ao efeito das condições climáticas do dia anterior. Uma temperatura exterior média na ordem dos 23°C e uma radiação solar média cerca de 88 W/m² conduziram

ao aumento da temperatura superficial interior da parede fina que, sendo superior à temperatura interior do gabinete durante as últimas horas do dia, originou um fluxo de calor no sentido do exterior para o interior. O mesmo não se verifica na parede espessa devido à sua maior massa térmica. Pelo facto de, para um mesmo período de tempo, a parede espessa aquecer mais lentamente, a temperatura superficial interior desta não atinge valores tão altos quando comparada com a temperatura superficial interior da parede fina e, por isso, mantendo-se próxima da temperatura interior o fluxo de calor tende a ser próximo de zero.

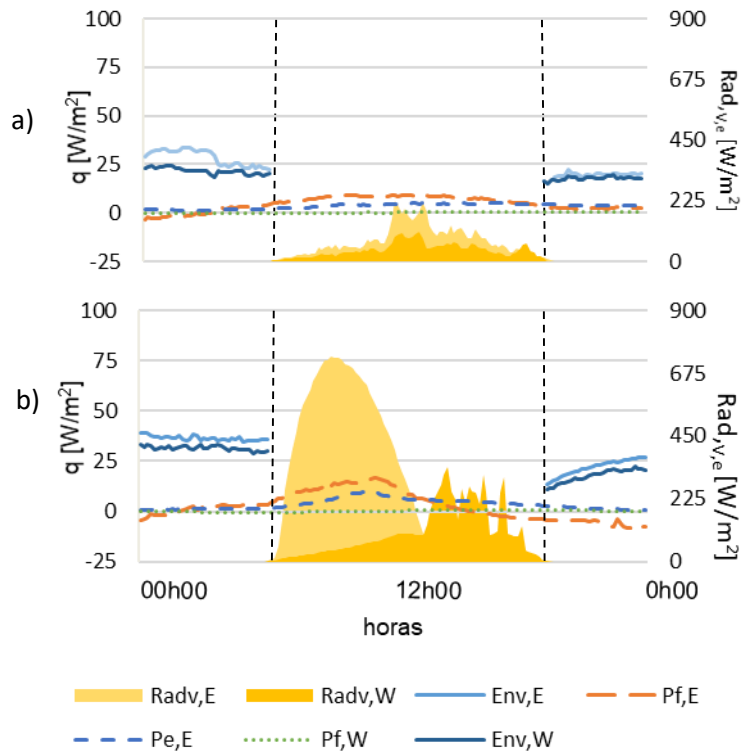


Figura 5.6 - Fluxos de calor: a) Dia com menor radiação solar (DmR); b) Dia com maior radiação solar (DMR).

Relativamente ao DMR, observa-se que, em ambas as paredes, a maior variação do fluxo de calor corresponde ao período de insolação. No que respeita ao fluxo de calor através da parede fina, constata-se mais uma vez que este é fortemente condicionado pela radiação solar que incide na fachada do gabinete. O efeito que a radiação solar exerce sobre a temperatura interior do gabinete nas primeiras horas leva a que esta se distancie da temperatura superficial interior para uma gama de valores ligeiramente superior. Deste modo, durante este período, o fluxo através da parede fina é positivo e tende a aumentar até ao momento em que a temperatura superficial interior acusando, por um lado, a influência da radiação solar e por outro a influência da própria temperatura interior, comece também a aumentar restabelecendo, progressivamente, o equilíbrio térmico com o ambiente interior. Uma vez reduzida a diferença entre as referidas temperaturas, o fluxo de calor vai diminuindo nas restantes horas do dia, passando a ser negativo a partir do momento em que a temperatura superficial interior é superior à temperatura interior. No que diz

respeito ao fluxo de calor através da parede espessa, constata-se que este, sendo sempre positivo, tende a aumentar nas primeiras horas de radiação solar, e a decrescer, tendendo para zero, nas restantes horas do dia. Mais uma vez o efeito da inércia térmica pode justificar a diferença entre os fluxos registados nas paredes em análise.

É interessante observar que, em comparação com o sucedido no DMF analisado na campanha de inverno, também representativo dos dias de maior radiação, o fluxo de calor em ambas as paredes do gabinete de Psicologia, nas primeiras horas de radiação solar, atingiu valores superiores aos registados no DMR em análise. Tendo em conta que a temperatura exterior também influencia as temperaturas superficiais de ambas as paredes, o facto de esta ter sido consideravelmente inferior no DMF originou uma maior discrepância entre a temperatura interior e a temperatura superficial interior e consequentemente a valores de fluxo maiores.

À semelhança do sucedido na campanha de inverno, também na estação de arrefecimento os resultados obtidos para os fluxos de calor através dos envidraçados de ambos os gabinetes evidenciam o seu baixo desempenho térmico. Note-se que, em ambos os dias, os fluxos são positivos e elevados, traduzindo-se numa perda de calor considerável do interior para o exterior.

6. Modelação e simulação energética do caso de estudo

Procede-se neste capítulo à construção de um modelo de simulação do desempenho energético dos gabinetes por utilização do programa de cálculo EnergyPlus, recorrendo-se aos resultados experimentais como meio de calibração do modelo e assim validar a sua aplicação em condições diferentes das monitorizadas. Será descrita, sumariamente, a metodologia adotada na construção do modelo e posteriormente será realizada uma análise do erro de modelação que permitirá aferir a sua adequabilidade e conseqüentemente aprovação do modelo de simulação.

6.1 Modelo de Simulação

O EnergyPlus é um programa de simulação dinâmica concebido para caracterizar o desempenho térmico e energético de um edifício [37]. Através da definição de uma grande variedade de parâmetros referentes à envolvente e constituição do edifício, o programa permite de forma eficiente e expedita proceder à análise de um edifício em diferentes domínios, relacionados com a eficiência térmica e energética, como seja o desempenho térmico na estação de aquecimento e arrefecimento e os consumos energéticos que lhe são inerentes [37].

O programa dispõe de um executável, o “*EP-Launch*”, que recorrendo aos dados inseridos nos dois ficheiros de entrada - o ficheiro IDF- Input Data File (onde são preenchidos os diversos campos referentes à caracterização física do edifício) e o ficheiro climático “*Weather file*” (ficheiro que contém os parâmetros da climatologia do local onde o edifício está localizado) - produz alguns ficheiros de saída, destacando-se entre eles dois ficheiros em formato texto, um que descreve o número de erros que o programa encontrou e um outro que contém o resultado das simulações efetuadas pelo programa, tendo em conta as variáveis selecionadas como “*Output*” pelo utilizador.

A construção do modelo teve início na criação da geometria dos gabinetes em estudo. Nesta matéria o programa *EnergyPlus* é dotado de alguma complexidade, pelo que a geometria dos gabinetes foi definida com o auxílio do programa *Google Sktechup*, que através de uma extensão - o *Openstudio Sketchup Plugin* - permite a interação com o programa *EnergyPlus*. Deste modo, uma vez criada a geometria dos gabinetes e com o auxílio da referida ferramenta de extensão deste programa, que guarda os dados no ficheiro de modelação IDF, foi possível a definição da modelação geométrica em 3D no *EnergyPlus*, onde muitos parâmetros, nomeadamente os referentes à geometria, foram automaticamente preenchidos. Neste processo, pode considerar-se que um gabinete se pode assemelhar, do ponto de vista da modelação, a uma zona térmica, ou seja, a um volume de ar em que as condições térmicas são homogéneas. Assim, neste trabalho apenas foi definida uma zona térmica, que se denominou “*Thermalzone1*”. Na Figura 6.1 observa-se a geometria dos gabinetes no programa Google Sketchup.

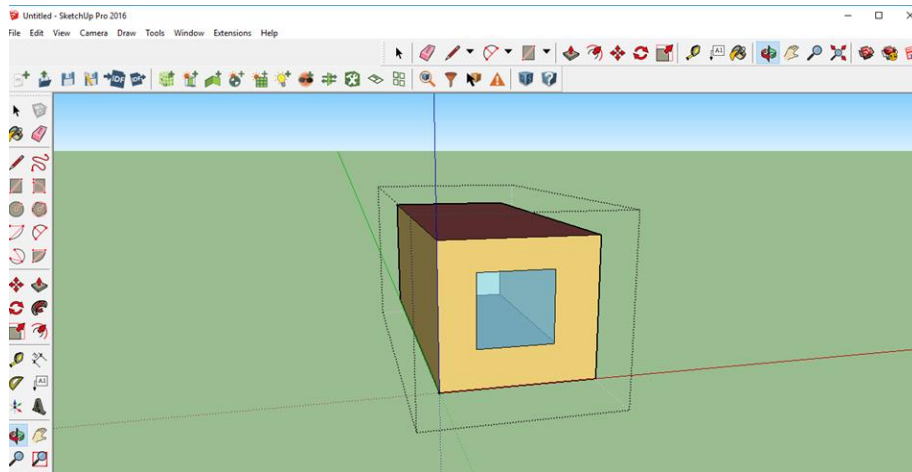


Figura 6.1 - Geometria dos gabinetes no programa Google Sketchup.

Como referido, o programa acede aos dados inseridos no ficheiro climático *Weather file*. Este ficheiro depende da localização geográfica do caso de estudo e contém todos os dados referentes à climatologia local relevantes para a simulação, tais como a temperatura exterior, a radiação global horizontal, a radiação solar difusa, entre outros. O ficheiro *Weather file* quando descarregado diretamente do site da internet do *EnergyPlus*, representa um ano típico em termos climáticos. Este ficheiro existe para a cidade de Lisboa, onde se localiza o caso de estudo, e será utilizado mais à frente neste trabalho. No entanto, nesta fase do estudo é importante efetuar a calibração do modelo desenvolvido, ou seja, obter, por tentativa e erro, os parâmetros do modelo, sobre os quais exista incerteza, que conduzam a resultados de simulação o mais próximos possível das medidas de desempenho recolhidas experimentalmente. Naturalmente que para o efeito devem ser utilizados os dados climáticos reais, e não do ano tipo, do período da campanha experimental escolhido para o processo de calibração. Deste modo, com recurso ao programa *Elements*, e procedendo às modificações do ficheiro climático original com a introdução dos dados meteorológicos mais importantes recolhidos na campanha experimental, nomeadamente, a temperatura exterior e a radiação solar global horizontal medida na cobertura do edifício, foi criado um ficheiro climático para utilização na calibração do modelo.

O ficheiro IDF do EnergyPlus de entrada de dados possui vários grupos e subgrupos, que uma vez preenchidos permitem a caracterização pormenorizada de todo o edifício e sua envolvente. Apresenta-se de seguida uma breve descrição dos campos de entrada essenciais à construção do modelo de simulação. Importa ainda referir que para efeito de calibração e simulação foi escolhido o gabinete de Dermatologia cuja fachada exterior está orientada a Oeste.

6.1.1 Localização e período de simulação

O primeiro grupo do ficheiro IDF é o “*Simulations Parameters*”. Neste grupo são preenchidos os campos de entrada dos subgrupos relativos às características gerais da simulação a realizar onde, entre outros parâmetros, se define o nome do modelo de simulação, os critérios de exposição e distribuição solar e a frequência de reporte do resultado das simulações. Com efeito e atendendo ao facto de se ter optado por simular o gabinete de Dermatologia, definiu-se no subgrupo “*Building*” o valor de 270° para o ângulo que o edifício faz em planta com o Norte geográfico. Definiu-se a opção “*City*” tendo em conta a localização do edifício em meio urbano e os campos “*loads convergence tolerance value*” e “*temperature convergence tolerance value*”, relativos aos valores de convergência nas simulações, foram automaticamente definidos pelo programa com 0.04 e 0.4 °C. Para o campo de entrada “*Solar Distribution*” foi selecionada a opção “*FullInteriorAndExterior*”. Este parâmetro define o modo como o programa trata a radiação solar que incide no modelo em estudo e neste caso definiu-se a opção referida, admitindo que a radiação é absorvida/refletida pelos vários elementos da fachada de acordo com as respetivas absorptâncias. A Figura 6.2 ilustra o preenchimento dos referidos parâmetros do subgrupo “*Building*”.

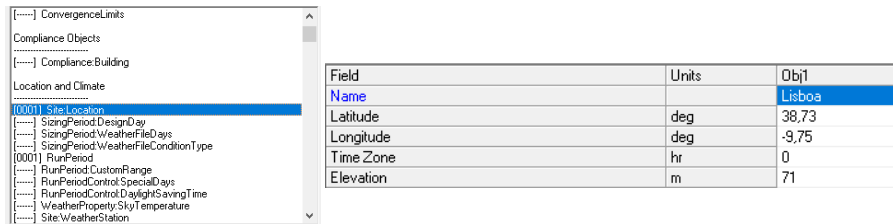
[0001] Version			
[0001] SimulationControl			
[0001] Building			
[0001] ShadowCalculation			
[0001] SurfaceConvectionAlgorithm:Inside			
[0001] SurfaceConvectionAlgorithm:Outside			

Field	Units	Obt
Name		GabPsico
North Axis	deg	270
Terrain		City
Loads Convergence Tolerance Value		0.04
Temperature Convergence Tolerance Value	deltaC	0.4
Solar Distribution		FullInteriorAndExteri
Maximum Number of Warmup Days		25
Minimum Number of Warmup Days		

Figura 6.2 - Subgrupo “*Building*” do ficheiro IDF.

Ainda inserido no primeiro grupo, foi preenchido o subgrupo denominado “*Timestep*”. Neste campo de entrada definiu-se a frequência de reporte dos resultados da simulação. Como o registo dos dados através dos sensores na campanha experimental foi efetuado de 10 em 10min optou-se por definir um “*Timestep*” de 60 para que os resultados da simulação fossem fornecidos também com o passo de 10min.

No “*Location and Climate*”, o segundo grupo do ficheiro IDF, foram preenchidos dois subgrupos: o “*Site:location*” e o “*RunPeriod*”. Como os próprios nomes sugerem, no primeiro subgrupo foi definida a localização do edifício e no segundo foi definido o período de simulação do modelo. A respeito da localização, os valores para a Latitude, Longitude e Altitude foram automaticamente preenchidos pelo programa de acordo com as informações que constam no ficheiro climático de Lisboa (Figura 6.3). Relativamente ao “*RunPeriod*”, foram definidos os dias e o mês dos períodos de simulação. No que diz respeito a este campo de entrada, importa referir que para efeitos de calibração do modelo de simulação, como se verá no subcapítulo seguinte, optou-se por utilizar os dados recolhidos no Gabinete de Dermatologia durante o período decorrido entre os dias 10 e 15 do mês julho.



Field	Units	Obj1
Name		Lisboa
Latitude	deg	38,73
Longitude	deg	-9,75
Time Zone	hr	0
Elevation	m	71

Figura 6.3 - Subgrupo “Site:Location” do ficheiro IDF.

6.1.2 Envoltente Opaca e Envidraçados

Todos os campos de entrada relativos às características dos materiais e respetivas soluções construtivas de cada elemento do gabinete, quer para a envoltente opaca, quer para os envidraçados, foram devidamente preenchidos nos respetivos subgrupos do grupo “*Surface Construction Elements*”. No que diz respeito à envoltente opaca e como foi descrito no capítulo 3, a fachada exterior do gabinete combina dois tipos de alvenaria - a “Parede Espessa” de alvenaria de Pedra e a “Parede Fina” de alvenaria de Tijolo maciço -, as paredes interiores são de alvenaria de tijolo furado e o pavimento é de betão armado com revestimento de tacos de madeira.

Apresenta-se de seguida as tabelas com as propriedades térmicas dos materiais de cada solução construtiva que permitiram o preenchimento do subgrupo “*Construction*” no ficheiro IDF (Figura 6.4). Salieta-se o facto de que os materiais estão orientados do exterior para o interior e que foram previamente inseridos no campo de entrada “*Materials*”.

Tabela 6.1 - Propriedades térmicas da solução construtiva da “Parede Espessa”.

Fachada exterior				
Parede espessa				
Material	Espessura	Condutibilidade	Massa volúmica	Calor específico
	[m]	[W/m°C.]	kg/ m ³	[J/kg°C.]
Reboco	0.02	0.81	1800	1000
Alvenaria de Pedra	0.51	1.31	2100	920
Reboco	0.02	0.81	1800	1000

Tabela 6.2 – Propriedades térmicas da solução construtiva da “Parede Fina”.

Fachada exterior				
Parede fina				
Material	Espessura [m]	Condutibilidade térmica [W/m.°C]	Massa volúmica [kg/m ³]	Calor específico [J/kg.°C]
Reboco	0.02	0.81	1800	1000
Alvenaria de tijolo Maciço	0.21	1.86	1800	960
Reboco	0.02	0.81	1800	1000

Tabela 6.3 - Propriedades térmicas da solução construtiva das paredes interiores.

Paredes interiores				
Material	Espessura [m]	Condutibilidade térmica [W/m.°C]	Massa volúmica [kg/m ³]	Calor específico [J/kg.°C]
Reboco	0.02	0.81	1800	1000
Alvenaria de Tijolo Furado	0.20	0.67	1550	960
Reboco	0.02	0.81	1800	1000

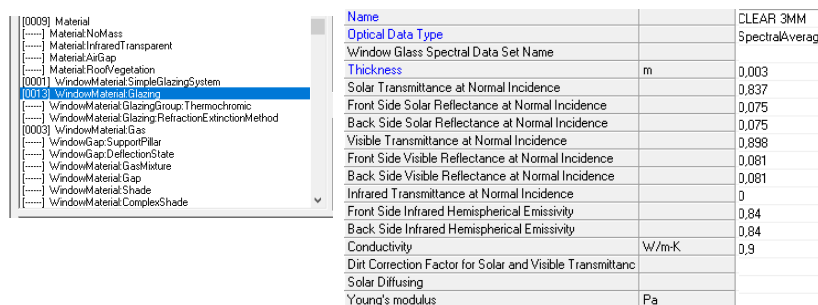
Tabela 6.4 - Propriedades térmicas da solução construtiva do pavimento.

Pavimento				
Material	Espessura [m]	Condutibilidade térmica [W/m.°C]	Massa volúmica [kg/m ³]	Calor específico [J/kg.°C]
Betão Armado	0.12	2	2400	940
Tacos de Madeira	0.02	0.14	600	1200

Obj1	Obj2	Obj3	Obj4	Obj5
Parede Fina	Parede espessa	Parede Interior	Pavimento	Tecto
reboco2cm	reboco2cm	reboco2cm	lajeBA12cm	Tacos Madeira
Tijolo Maciço	Alvenaria Pedra	Tijolo Furado	Tacos Madeira	lajeBA12cm
reboco2cm	reboco2cm	reboco2cm		

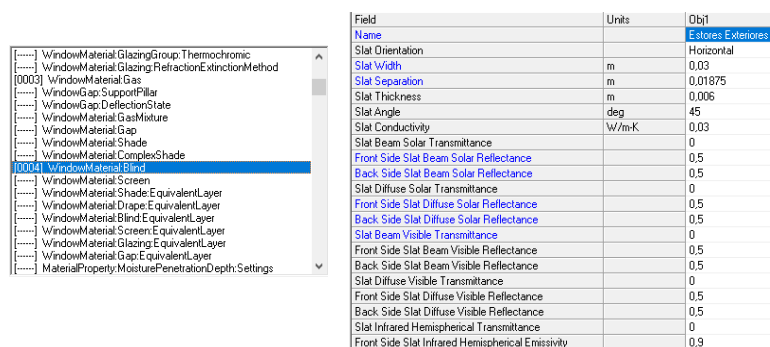
Figura 6.4 - Subgrupo “Construction” do ficheiro IDF.

Ainda neste grupo, nos subgrupos “*Window Material: Glazing*” e “*Window Material: Blind*” foram definidas as propriedades térmicas do envidraçado e do dispositivo de sombreamento, respetivamente (Figura 6.5 e 6.6). Como referido, o envidraçado apresenta grandes sinais de desgaste, o que contribui para o fraco desempenho térmico. Na impossibilidade de caracterizar exatamente as suas propriedades e sabendo somente que é incolor e tem 3 mm de espessura, recorreu-se à base de dados do programa EnergyPlus e adotou-se para efeito de calibração o vidro simples “Clear3 mm”. No que diz respeito ao dispositivo de sombreamento da janela, os estores são exteriores e o seu modelo é em “Persiana”, cujas lâminas plásticas horizontais, afastadas entre si 1.875 cm, têm 3 cm de largura, 0.6 cm de espessura e uma condutibilidade térmica de 0.03 W/m.°C.



Name		CLEAR 3MM
Optical Data Type		SpectralAverage
Window Glass Spectral Data Set Name		
Thickness	m	0,003
Solar Transmittance at Normal Incidence		0,837
Front Side Solar Reflectance at Normal Incidence		0,075
Back Side Solar Reflectance at Normal Incidence		0,075
Visible Transmittance at Normal Incidence		0,898
Front Side Visible Reflectance at Normal Incidence		0,081
Back Side Visible Reflectance at Normal Incidence		0,081
Infrared Transmittance at Normal Incidence		0
Front Side Infrared Hemispherical Emissivity		0,84
Back Side Infrared Hemispherical Emissivity		0,84
Conductivity	W/m-K	0,9
Dirt Correction Factor for Solar and Visible Transmittanc		
Solar Diffusing		
Young's modulus	Pa	

Figura 6.5 - Subgrupo “*Window Material: Glazing*” do ficheiro IDF.




Field	Units	Obj1
Name		Estores Exteriores
Slat Orientation		Horizontal
Slat Width	m	0,03
Slat Separation	m	0,01875
Slat Thickness	m	0,006
Slat Angle	deg	45
Slat Conductivity	W/m-K	0,03
Slat Beam Solar Transmittance		0
Front Side Slat Beam Solar Reflectance		0,5
Back Side Slat Beam Solar Reflectance		0,5
Slat Diffuse Solar Transmittance		0
Front Side Slat Diffuse Solar Reflectance		0,5
Back Side Slat Diffuse Solar Reflectance		0,5
Slat Beam Visible Transmittance		0
Front Side Slat Beam Visible Reflectance		0,5
Back Side Slat Beam Visible Reflectance		0,5
Slat Diffuse Visible Transmittance		0
Front Side Slat Diffuse Visible Reflectance		0,5
Back Side Slat Diffuse Visible Reflectance		0,5
Slat Infrared Hemispherical Transmittance		0
Front Side Slat Infrared Hemispherical Emissivity		0,9

Figura 6.6 - Subgrupo “*Window Material: Blind*” do ficheiro IDF.

No grupo seguinte de nome “*Thermal Zones and Surfaces*”, foram preenchidos os restantes subgrupos que permitiram a conclusão da definição quer da envolvente opaca, quer do envidraçado.

Relativamente à envolvente opaca do gabinete, foi definida no Campo “*Building Surface: Detailed*” (Figura 6.7). Neste campo de entrada, onde os dados referentes à geometria do gabinete foram preenchidos automaticamente no processo descrito anteriormente, definiu-se para cada elemento as condições de exposição ao sol e ao vento, o tipo de superfície que o caracteriza, a zona térmica onde está inserido e o seu tipo de condição de fronteira. Como a Parede exterior combina os dois tipos de alvenaria foi necessário criar dois objetos: o “Parede Oeste” e o “Parede Oeste 2”, cujos “*Construction name*” são “Parede espessa” e “Parede Fina”, respetivamente. Naturalmente, para estes dois objetos foi definida fronteira com o exterior

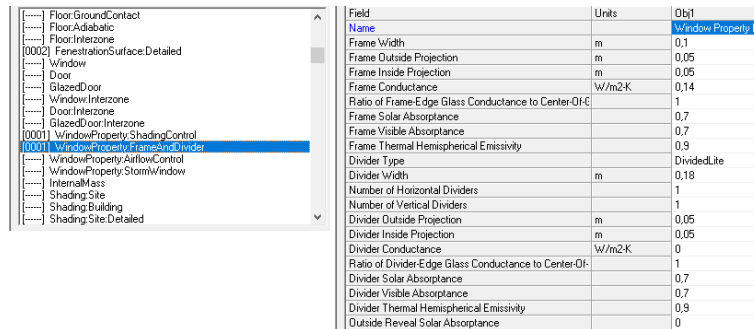
e a exposição ao sol e ao vento. No que diz respeito aos restantes elementos construtivos, quer as paredes interiores, denominadas “Parede Este”, “Parede Norte” e “Parede Sul”, quer as lajes, denominadas de “Pavimento” e “Teto”, foram definidos como sendo adiabáticas, e sem exposição ao sol e ao vento. Salienta-se ainda que pelo facto da “Parede Este” conter uma porta, o programa não permite que este elemento seja definido como adiabático. No entanto, e para que este elemento estivesse isolado de quaisquer trocas de calor, foi definido que o mesmo está em contacto com a “Parede Sul”.



Field	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4	Obj5	Obj6	Obj7
Name	Pavimento	Parede Norte	Parede Oeste	Parede Sul	Parede Este	Tecto	Parede Oeste 2
Surface Type	Floor	Wall	Wall	Wall	Wall	Roof	Wall
Construction Name	Pavimento	Parede Interior	Parede espessa	Parede Interior	Parede Interior	Tecto	Parede Fina
Zone Name	Thermal Zone 1	Thermal Zone 1	Thermal Zone 1	Thermal Zone 1	Thermal Zone 1	Thermal Zone 1	Thermal Zone 1
Outside Boundary Condition	Adiabatic	Adiabatic	Outdoors	Adiabatic	Surface	Adiabatic	Outdoors
Outside Boundary Condition Object					Parede Sul		
Sun Exposure	NoSun	NoSun	SunExposed	NoSun	NoSun	NoSun	SunExposed
Wind Exposure	NoWind	NoWind	WindExposed	NoWind	NoWind	NoWind	WindExposed

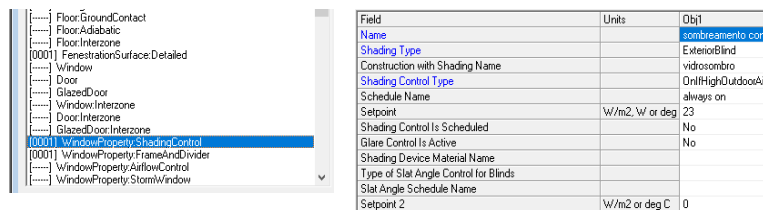
Figura 6.7 - Subgrupo “Building Surface Detailed” do ficheiro IDF.

Para uma correta definição do envidraçado, foi necessário definir as propriedades térmicas da caixilharia e um método de controlo para o dispositivo de sombreamento. As referidas definições foram feitas nos subgrupos “WindowProperty:Frame and Divider” e “Window Property: Shading control”, respetivamente (Figuras 6.8 e 6.9). No que diz respeito a este último subgrupo importa referir que o acionamento do dispositivo de sombreamento foi definido com base num “set point” de 23 °C para a temperatura ambiente exterior. Assim, sempre que a temperatura ambiente exterior atinja um valor igual ou superior a 23 °C os estores exteriores são acionados. Finalmente, e fazendo uso de todos os campos de entrada referentes aos envidraçados descritos anteriormente, foi definido no subgrupo “Fenestration Surface:Detailed” a janela do gabinete de Dermatologia (Figura 6.10).



Field	Units	Obj1
Name		WindowProperty:Fr
Frame Width	m	0,1
Frame Outside Projection	m	0,05
Frame Inside Projection	m	0,05
Frame Conductance	W/m2-K	0,14
Ratio of Frame-Edge Glass Conductance to Center-Of-C		1
Frame Solar Absorptance		0,7
Frame Visible Absorptance		0,7
Frame Thermal Hemispherical Emissivity		0,9
Divider Type		DividedLite
Divider Width	m	0,18
Number of Horizontal Dividers		1
Number of Vertical Dividers		1
Divider Outside Projection	m	0,05
Divider Inside Projection	m	0,05
Divider Conductance	W/m2-K	0
Ratio of Divider-Edge Glass Conductance to Center-Of-C		1
Divider Solar Absorptance		0,7
Divider Visible Absorptance		0,7
Divider Thermal Hemispherical Emissivity		0,9
Outside Reveal Solar Absorptance		0

Figura 6.8 - Subgrupo “WindowProperty:Frame and Divider” do ficheiro IDF.



Field	Units	Obj1
Name		sombreamento cont
Shading Type		ExteriorBlind
Construction with Shading Name		vidrosombro
Shading Control Type		OnOffHighOutdoorAir
Schedule Name		always on
Setpoint	W/m2, W or deg C	23
Shading Control Is Scheduled		No
Glare Control Is Active		No
Shading Device Material Name		
Type of Slat Angle Control for Blinds		
Slat Angle Schedule Name		
Setpoint 2	W/m2 or deg C	0

Figura 6.9 - Subgrupo “Window Property: Shading control” do ficheiro IDF.

Field	Units	Obj1
Name		janelaup
Surface Type		Window
Construction Name		Vidro
Building Surface Name		Parede Oeste
Outside Boundary Condition Object		
View Factor to Ground		0,5
Shading Control Name		sombreamento cont
Frame and Divider Name		
Multitier		

Figura 6.10 - Subgrupo "Fenestration Surface:Detailed" do ficheiro IDF.

6.1.3 Ganhos internos, padrões de utilização do gabinete (horário de ocupação do gabinete) e ventilação

São considerados ganhos internos todos aqueles que resultam de fontes de calor existentes dentro de um edifício e que contribuem para o aquecimento do ambiente embora não tenham esta função. Quer o calor gerado pela iluminação e equipamentos elétricos, quer o calor gerado pela própria atividade humana são considerados fontes de calor que contribuem para os referidos ganhos e por isso foi importante quantificar a taxa de ocupação do gabinete e o número de pessoas que nele permanecem durante o período de ocupação, o horário laboral. Deste modo, e tendo em conta o tipo de serviço a que o gabinete se destina, foi definido para efeito de ganho interno uma ocupação diária de duas pessoas (médico e paciente) durante o horário laboral referente ao período de consultas decorrente entre as 8h e as 15h de segunda a sexta-feira. O referido horário laboral e o número de pessoas que ocupam o gabinete foram definidos nos subgrupos "Schedule:Compact" e "People" (Figura 6.11), respetivamente. Salienta-se o facto de que o primeiro subgrupo referido pertence ao grupo "Schedules" e o segundo pertence ao grupo "Internal Gains".

Field	Units	Obj1
Name		Consultas
Zone or ZoneList Name		Thermal Zone 1
Number of People Schedule Name		Horario Laboral
Number of People Calculation Method		People
Number of People		2
People per Zone Floor Area	person/m2	
Zone Floor Area per Person	m2/person	
Fraction Radiant		0,4
Sensible Heat Fraction		autocalculate
Activity Level Schedule Name		actividade Pessoa
Carbon Dioxide Generation Rate		0,000000382
Enable ASHRAE 55 Comfort Warnings	m3/s/W	Yes
Mean Radiant Temperature Calculation Type		ZoneAveraged
Surface Name/Angle Factor List Name		
Work Efficiency Schedule Name		
Clothing Insulation Calculation Method		
Clothing Insulation Calculation Method Schedule Name		
Clothing Insulation Schedule Name		
Air Velocity Schedule Name		
Thermal Comfort Model 1 Type		
Thermal Comfort Model 2 Type		

Figura 6.11 - Subgrupo "People" do ficheiro IDF.

Ainda no grupo "Internal Gains", no que diz respeito à iluminação foi definido no subgrupo "Lights" (Figura 6.12) um ganho interno de 10 W/m² referente aos dois candeeiros existentes no gabinete, e no que se refere aos equipamentos elétricos foi definido no subgrupo "Electric Equipments" (Figura 6.13) um ganho

de 10 W/m² referente a um computador e a um equipamento médico de observação (em termos de consumos equiparado a um computador). Salienta-se ainda, que para efeitos de simulação, quer os ganhos com a iluminação, quer os ganhos com o equipamento elétrico apenas foram considerados durante o horário laboral, pois após a última consulta as luzes eram apagadas e os aparelhos elétricos desligados.

Field	Units	Obj1
Name		Iluminacao
Zone or ZoneList Name		Thermal Zone 1
Schedule Name		Horario Laboral
Design Level Calculation Method		Watts/Area
Lighting Level		
Watts per Zone Floor Area	W/m2	10
Watts per Person	W/person	
Return Air Fraction		
Fraction Radiant		0.7
Fraction Visible		0.2
Fraction Replaceable		1
End-Use Subcategory		
Return Air Fraction Calculated from Plenum Temperature		No
Return Air Fraction Function of Plenum Temperature Co		
Return Air Fraction Function of Plenum Temperature Co	1/K	

Figura 6.12 - Subgrupo “Ligths” do ficheiro IDF.

Field	Units	Obj1
Name		Equipamento
Zone or ZoneList Name		Thermal Zone 1
Schedule Name		Horario Laboral
Design Level Calculation Method		EquipmentLevel
Design Level	W	0
Watts per Zone Floor Area	W/m2	10
Watts per Person	W/person	
Fraction Latent		
Fraction Radiant		
Fraction Lost		
End-Use Subcategory		General

Figura 6.13 - Subgrupo “Electric Equipment” do ficheiro IDF.

A ventilação é um parâmetro que influencia diretamente a temperatura ambiente interior e os fluxos de calor através dos elementos do gabinete em estudo. Enquanto relativamente às propriedades dos elementos de construção, elas podem ser obtidas com um bom grau de aproximação, desde que a constituição daqueles elementos seja conhecida, no que toca a ventilação dos espaços, se não for realizada por via mecânica, onde o controlo dos caudais existe, é elevado o grau de incerteza quanto aos valores das renovações do ar horárias, o que torna a modelação deste parâmetro um desafio para quem projeta. Na impossibilidade de conhecer ao certo os níveis de ventilação natural dos espaços, uma vez que esta depende de inúmeros parâmetros – condições do ambiente exterior, permeabilidade do ar envolvente, padrões de comportamento -, sobre os quais ou não se tem ou se tem pouco controlo, admitem-se no projeto valores que a experiência prática mostra serem adequados. Assim, no subgrupo “ZoneInfiltration: DesignFlowRate”, do grupo “Zone Airflow” foi definido, para todos os dias um valor de renovação de ar horária de 1.5 h⁻¹ (Figura 6.14), tendo em conta que a ventilação é realizada de forma natural através dos vãos existentes e que a abertura das portas dos gabinetes para os corredores é relativamente frequente para a entrada e saída de pessoas e arejamento do ambiente.

Field	Units	Obj1
Name		Infiltração
Zone or ZoneList Name		ThermalZone 1
Schedule Name		Always On Continuc
Design Flow Rate Calculation Method		AirChanges/Hour
Design Flow Rate	m3/s	
Flow per Zone Floor Area	m3/s-m2	
Flow per Exterior Surface Area	m3/s-m2	
Air Changes per Hour	1/hr	1,5
Constant Term Coefficient		
Temperature Term Coefficient		
Velocity Term Coefficient		
Velocity Squared Term Coefficient		

Figura 6.14 - Subgrupo “ZoneInfiltration: DesignFlowRate” do ficheiro IDF.

6.1.4 Obtenção de Dados

Como se verá no subcapítulo seguinte, a calibração do modelo foi feita com base na análise da temperatura ambiente interior do gabinete de Dermatologia. Deste modo, para obter como dado de saída a referida temperatura com a frequência horária pretendida, foi selecionado no subgrupo “Output: Variable” a variável “Zone Mean Air Temperature” e o “Timestep” (anteriormente definido), respetivamente (Figura 6.15). Uma vez que na campanha experimental os dados foram registados de 10 em 10 min, optou-se por solicitar ao programa os resultados na mesma frequência horária a fim de facilitar posteriormente a sua análise e a calibração do modelo.

Field	Units	Obj1
Key Value		*
Variable Name		Zone Mean Air Temperature
Reporting Frequency		Timestep
Schedule Name		

Figura 6.15 - Subgrupo “Output:Variable” do ficheiro IDF.

6.2 Calibração do Modelo de Simulação

A validação da campanha experimental foi feita com base na comparação dos registos da temperatura ambiente interior recolhidos na campanha experimental com os resultados para mesma temperatura fornecidos pelo programa de simulação. Como referido, a calibração do modelo foi feita recorrendo aos dados recolhidos e simulados para o gabinete de Dermatologia no período de tempo decorrido entre os dias 10 e 15 do mês de julho.

Posteriormente, e a fim de aferir a adequabilidade do modelo de simulação criado, foi realizada uma avaliação do erro da modelação através da análise dos parâmetros “Root Mean Square Error” (RMSE) e a sua variação C_v (RMSE), e o “Mean Bias Error” (MBE_n) definidos pelas seguintes expressões [36, 37, 38]:

$$MBE_n(\%) = \frac{\sum_{i=1}^n (X_{sim,i} - X_{exp,i})}{\sum_{i=1}^n (X_{exp,i})} \times 100\% \quad (6.1)$$

$$C_v(\text{RMSE}) = \frac{RMSE_n}{\bar{X}_{exp}} \times 100\% \quad (6.2)$$

$$RMSE_n = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_{sim,i} - X_{exp,i})^2}{n}} \quad (6.3)$$

$$\bar{X}_{exp} = \frac{\sum_{i=1}^n (X_{exp,i})}{n} \quad (6.4)$$

onde $X_{sim,i}$ e $X_{exp,i}$ são os resultados da simulação e experimentais, respetivamente, \bar{X}_{exp} é o valor médio experimental e n é o número de dados de entrada.

Como as referidas expressões sugerem, o parâmetro $RMSE_n$ (Erro Quadrático da Raiz Média) calcula o desvio médio entre os valores da simulação, o C_v (RMSE) (variação do Erro Quadrático da Raiz Média) é uma medida normalizada que determina quão bem os valores da simulação se ajustam aos valores experimentais considerando tanto as diferenças positivas quanto as negativas, e o MBE_n calcula a média das diferenças entre os valores da simulação e os valores experimentais.

Apresenta-se na Figura 6.16 os valores para a temperatura ambiente interior resultantes da simulação, os valores para a mesma temperatura registados na campanha experimental e ainda a radiação solar medida no plano vertical da fachada.

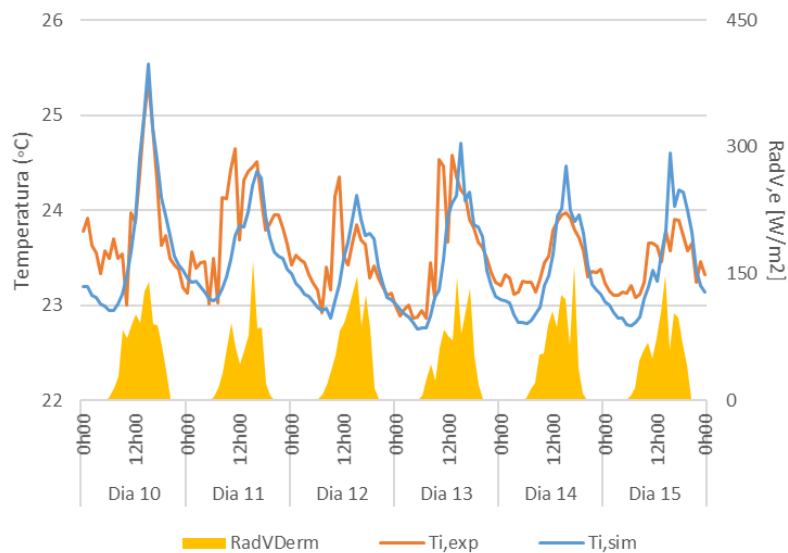


Figura 6.16 - Comparação da temperatura ambiente interior simulada no EnergyPlus com a temperatura ambiente interior registada na campanha experimental nos dias 10 a 15 de julho.

Como se pode observar na Figura 6.16, ao longo dos dias em análise: i) a temperatura ambiente interior simulada ($T_{i,sim}$) acusa coerentemente a influência da radiação solar medida experimentalmente; ii) o andamento da temperatura ambiente interior experimental apresenta uma maior irregularidade devido à grande sensibilidade do sensor; iii) a menos de uma pequena discrepância dos valores de pico, a temperatura ambiente interior simulada ($T_{i,sim}$) apresenta o mesmo andamento da temperatura ambiente registada experimentalmente. Pelo exposto, e da observação do gráfico em análise, é possível concluir que a modelação do gabinete é adequada. Por outro lado, os valores de -0.61 e de 1.62 obtidos para os parâmetros C_v (RMSE) e MBE_n , respetivamente, estão dentro dos valores preconizados pela literatura [38, 39, 40], o que confirma uma boa aproximação dos resultados da simulação ao comportamento térmico real do gabinete.

7. Análise do impacte de intervenções de reabilitação energética

Uma vez calibrado o modelo, apresenta-se neste capítulo o resultado de várias simulações com vista a obter um conjunto de possíveis soluções que potenciem um melhor desempenho térmico para o gabinete. Assim, serão estudadas como possíveis intervenções, a aplicação de uma placa de poliestireno extrudido (XPS) quer pelo interior, quer pelo exterior e ainda a substituição do envidraçado na fachada exterior. Analisar-se-á individualmente a aplicação de várias espessuras de isolamento, de quatro tipos de envidraçados e, por último, a combinação das duas medidas de intervenção em estudo. Por último, pelo facto de o edifício ser constituído por divisões similares aos gabinetes em estudo no último piso, será feita uma análise e proposta de reabilitação energética para a solução da cobertura. Deste modo, será analisada a poupança energética resultante da combinação do melhor conjunto de medidas de intervenção na fachada exterior com uma proposta de intervenção para a cobertura onde se considera também a aplicação de XPS pelo exterior. Apresenta-se na Figura 7.1 a metodologia adotada a respeito das intervenções simuladas.

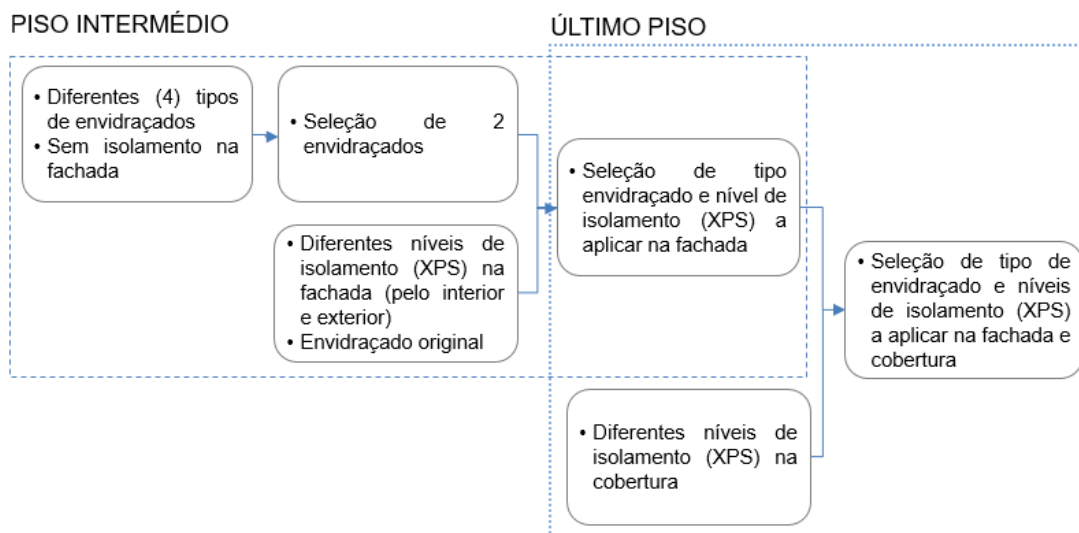


Figura 7.1 – Metodologia adotada para a simulação das medidas de intervenção.

7.1 Considerações gerais

O estudo do potencial das medidas de intervenção selecionadas foi feito com base na análise das necessidades de energia útil quer na estação de aquecimento quer na estação de arrefecimento e por fim da energia total anual consumida pelo gabinete. Para tal, foi admitido a existência de um sistema de AVAC que regulará a temperatura ambiente interior do gabinete em ambas as estações, mantendo esta dentro de uma gama de valores aceitável do ponto de vista do conforto térmico no interior do gabinete. O referido

sistema de AVAC fictício foi introduzido e definido no programa de simulação nos subgrupos *HVACTemplate:Thermostat* (Figura 7.2) e *HVACTemplate:ZoneIdealLoadsAirSystem* (Figura 7.3). Tendo em conta a gama de valores para a temperatura de conforto térmico preconizada pela literatura, optou-se por definir este sistema com base num *Set Point* de temperaturas com os valores de 18 e 25 °C para as estações de aquecimento e arrefecimento, respetivamente. Quer isto dizer que sempre que o gabinete se encontre a uma temperatura inferior a 18°C ou superior a 25°C o sistema de AVAC é acionado para aquecimento ou arrefecimento, respetivamente. Salienta-se ainda que o referido método de regulação do sistema de AVAC foi definido apenas para o horário laboral.

Field	Units	Obj1
Name		Ar_condi
Heating Setpoint Schedule Name		
Constant Heating Setpoint	C	18
Cooling Setpoint Schedule Name		
Constant Cooling Setpoint	C	25

Figura 7.2 - Subgrupo *HVACTemplate:Thermostat* do ficheiro IDF.

Field	Units	Obj1
Zone Name		Thermal Zone 1
Template Thermostat Name		Ar_condi
System Availability Schedule Name		Horario Laboral
Maximum Heating Supply Air Temperature	C	50
Minimum Cooling Supply Air Temperature	C	13
Maximum Heating Supply Air Humidity Ratio	kgWater/kgDryA	
Minimum Cooling Supply Air Humidity Ratio	kgWater/kgDryA	
Heating Limit		NoLimit
Maximum Heating Air Flow Rate	m3/s	
Maximum Sensible Heating Capacity	W	
Cooling Limit		NoLimit

Figura 7.3 - Subgrupo *HVACTemplate:ZoneIdealLoadsAirSystem* do ficheiro IDF.

Foi igualmente necessário introduzir dois novos outputs no programa referentes às variáveis em análise neste capítulo. Deste modo, e selecionando no subgrupo *Output:variable* as variáveis *zone ideal loads zone total heating energy* e *zone ideal loads zone total cooling energy* foi possível obter as necessidades de energia útil de aquecimento de arrefecimento, com as quais foi calculado posteriormente a energia total anual, o parâmetro principal para a análise realizada. Importa ainda referir que todas as medidas de intervenção foram analisadas sem considerar a existência dos estores exteriores e que o ficheiro climático usado para o efeito foi um ficheiro sem qualquer alteração, obtido diretamente da base de dados do programa e representativo de um ano típico e corrente da climatologia em Lisboa.

7.2 Piso intermédio

7.2.1 Envidraçados

Para a substituição do envidraçado existente, foram selecionados para efeitos de análise 4 tipo de envidraçados, todos eles duplos - com um pano exterior de 6mm, caixa de ar de 16mm e pano interior de 4mm, - mas com propriedades térmicas distintas. Recorrendo à base de dados “*dataSets*” do programa *EnergyPlus* foram então selecionadas como possíveis medidas de intervenção os vidros denominados neste trabalho de “Duplo Incolor”, “Duplo cinzento”, “Duplo refletivo” e “Duplo de baixa emissividade”. Estas soluções de envidraçados são constituídas por diferentes tipos de vidro cujas propriedades térmicas se encontram definidas no subgrupo “*WindowMaterials:Glazing*” (Figura 7.4), e que posteriormente foram utilizados para a criação de cada envidraçado duplo no subgrupo “*Construction*” (Figura 7.5). No que diz respeito à caixa de ar, a mesma foi definida no subgrupo “*WindowMaterial:Gas*” (Figura 7.6).

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4	Obj5	Obj6	Obj7	Obj8
Name		CLEAR 6MM	GREY 6MM	GREY 4MM	REF A CLEAR LO E LoE CLEAR 6MM	CLEAR 4MM	CLEAR 4MM	CLEAR 3MM	4mm
Optical Data Type		SpectralAverage	SpectralAverage	SpectralAverage	SpectralAverage	SpectralAverage	SpectralAverage	SpectralAverage	SpectralAverage
Window Glass Spectral Data Set Name									
Thickness	m	0.006	0.006	0.004	0.006	0.006	0.004	0.003	0.004
Solar Transmittance at Normal Incidence		0.775	0.455	0.626	0.066	0.6	0.775	0.637	0.2325
Front Side Solar Reflectance at Normal Incidence		0.071	0.053	0.061	0.341	0.17	0.071	0.075	0.7175
Back Side Solar Reflectance at Normal Incidence		0.071	0.053	0.061	0.433	0.22	0.071	0.075	0
Visible Transmittance at Normal Incidence		0.881	0.431	0.611	0.08	0.84	0.881	0.898	0.3192
Front Side Visible Reflectance at Normal Incidence		0.08	0.052	0.061	0.41	0.055	0.08	0.081	0.6308
Back Side Visible Reflectance at Normal Incidence		0.08	0.052	0.061	0.37	0.078	0.08	0.081	0

Figura 7.4 - Subgrupo “*WindowMaterials:Glazing*” do ficheiro IDF.

Field	Units	Obj8	Obj9	Obj10	Obj11
Name		DoubleClear	DoubleGrey	Double Ref A-L	Double LoE (e2=.1)
Outside Layer		CLEAR 6MM	GREY 6MM	REF A CLEAR LO E	LoE CLEAR 6MM
Layer 2		AIR 16MM	AIR 16MM	AIR 16MM	AIR 16MM
Layer 3		CLEAR 4MM	GREY 4MM	CLEAR 4MM	CLEAR 4MM
Layer 4					

Figura 7.5 - Subgrupo “*Construction*” do ficheiro IDF.

Field	Units	Obj1
Name		AIR 16MM
Gas Type		Air
Thickness	m	0.016
Conductivity Coefficient A	W/m-K	
Conductivity Coefficient B	W/m-K2	

Figura 7.6 - Subgrupo “*WindowMaterials:Gas*” do ficheiro IDF.

Como se pode observar na Figura 7.5, todas as soluções criadas para os envidraçados têm uma caixa de ar de 16mm e um vidro incolor de 4mm no pano interior. Apenas o vidro de 6mm do pano exterior cuja principal característica dá nome às soluções criadas - “Duplo Incolor”, “Duplo Cinzento”, “Duplo Refletivo”, “Duplo de Baixa emissividade” - os distingue. A respeito da definição do envidraçado, salienta-se o facto

de que a morfologia da caixilharia foi mantida e que apenas foi introduzida no subgrupo “*WindowProperty:FrameAndDivider*” a condutibilidade térmica correspondente ao material PVC.

A seleção dos envidraçados a simular foi assim realizada com o objetivo de estudar o desempenho térmico do gabinete perante soluções com propriedades térmicas distintas e aferir qual delas representa, para o caso de estudo, uma melhor solução como medida de intervenção para a substituição do envidraçado. Desta feita, optou-se por simular a substituição do envidraçado original por cada uma das 4 soluções de envidraçados acima referidas, para os casos em que a fachada exterior do gabinete está orientada a Oeste, Este, Norte e Sul. Apesar do objeto de estudo ao longo deste trabalho ter sido o Gabinete de Dermatologia, cuja fachada exterior está orientada a Oeste e o Gabinete de Psicologia cuja fachada exterior está orientada a Este, optou-se também por efetuar simulações nos casos em que a fachada exterior está orientada a Sul e a Norte, pois o edifício Dr. Francisco Gentil contém gabinetes similares sujeitos à exposição solar nestas orientações. Apresenta-se, na Figura 7.7, os resultados obtidos para as necessidades de energia útil na estação de aquecimento e arrefecimento, para a situação original em que o envidraçado é constituído por um vidro simples de espessura 3mm e para as situações em que se procede à substituição deste por cada um dos envidraçados selecionados como medida de intervenção, quando a fachada exterior do gabinete está orientada a Oeste (Gabinete de Dermatologia), a Este (Gabinete de Psicologia), a Norte e a Sul.

No que diz respeito à situação original, é possível observar que: i) à exceção do caso em que a fachada exterior está orientada a Norte, as necessidades de energia útil de arrefecimento, na ordem dos 35-40 kWh/m²/ano, são consideravelmente superiores às necessidades de energia útil de aquecimento, o que revela que presentemente os gabinetes apresentam um melhor desempenho térmico na estação de aquecimento ao invés do que acontece na estação de arrefecimento, onde com maior frequência é ultrapassada a temperatura limite de conforto térmico; ii) os resultados obtidos quer para as Necessidades de energia útil de aquecimento quer para as necessidades de energia útil de arrefecimento são semelhantes, nos casos em que a fachada exterior está orientada a Este e a Oeste. O facto de o sol nascer a Este e pôr-se a Oeste, sujeitando os gabinetes de Dermatologia (Oeste) e de Psicologia (Este) a uma radiação solar similar, justifica este resultado; iii) na situação em que a fachada exterior está orientada a Sul, as necessidades de energia útil de aquecimento, na ordem dos 0.50 kWh/m²/ano, são comparativamente aos outros casos muito baixas. O facto de ser nesta orientação que os ganhos solares são maiores poderá justificar este resultado; iv) por oposição ao que acontece a Sul, no caso em que a fachada exterior está orientada a Norte, onde os ganhos solares são menores, as necessidades de energia útil de aquecimento são maiores do que nos outros casos de exposição solar e por sua vez as necessidades de energia útil de arrefecimento são menores.

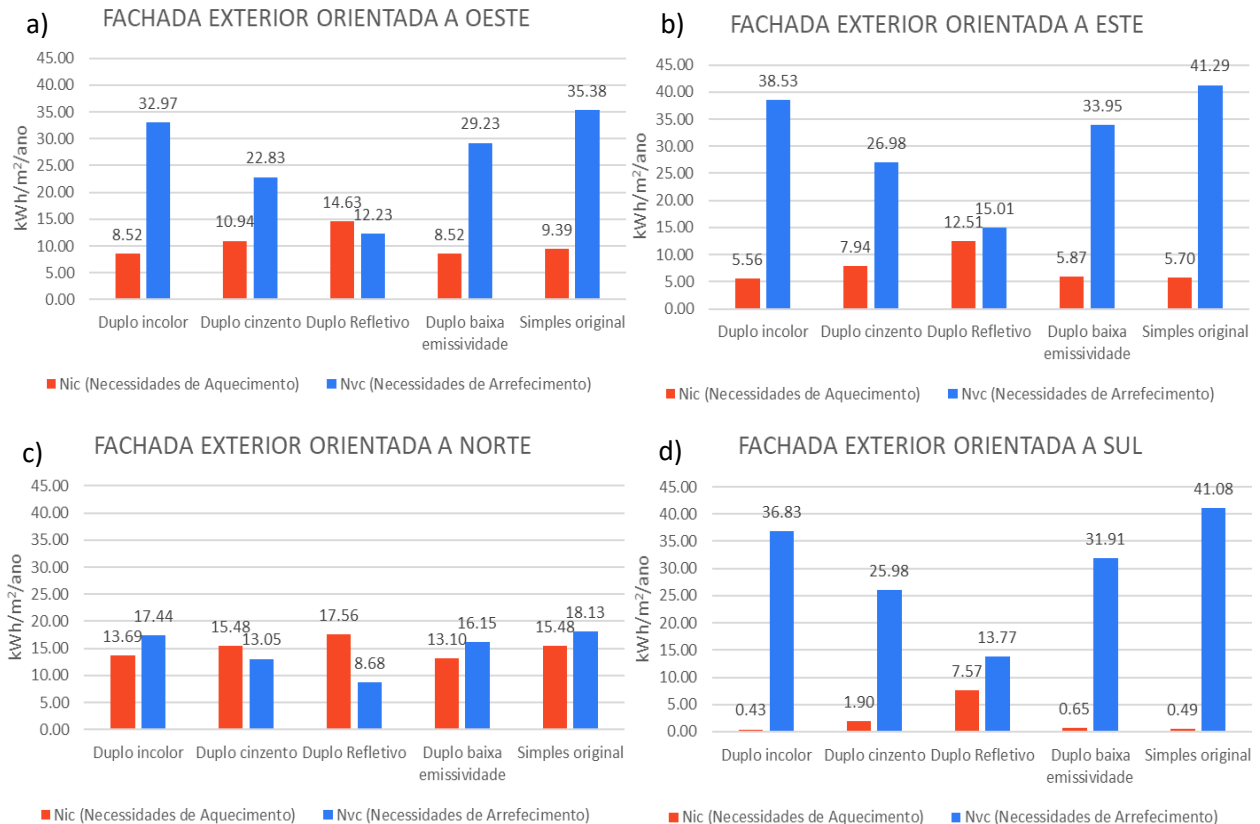


Figura 7.7 - Necessidades de Aquecimento e Arrefecimento do gabinete quando aplicados os 4 envidraçados em estudo para: a) fachada exterior orientada a Oeste; b) fachada exterior orientada a Este; c) fachada exterior orientada a Norte; d) fachada exterior orientada a Sul.

Pelo exposto e da análise dos resultados obtidos, é possível concluir que o gabinete que apresenta um melhor desempenho térmico na estação de aquecimento é o gabinete cuja fachada exterior está orientada a Sul. Por outro lado, o que apresenta o desempenho térmico mais fraco nesta estação é o gabinete cuja fachada está orientada a Norte. No que diz respeito à estação de arrefecimento, ao invés do que acontece na estação de aquecimento, o gabinete cuja fachada está orientada Norte é, dos quatro em estudo, aquele que apresenta o melhor desempenho térmico. Como referido, o facto de este gabinete ter menos ganhos solares poderá justificar este resultado. Por outro lado, embora todos os restantes gabinetes - Gabinete de Dermatologia (Oeste), Gabinete de Psicologia (Este) e o gabinete cuja fachada exterior está orientada a Sul - tenham um comportamento térmico semelhante e menos favorável, o gabinete Este é aquele que apresenta o desempenho mais fraco na estação de arrefecimento. Salienta-se ainda que no geral, é na estação de aquecimento que os gabinetes atingem temperaturas interiores superiores à temperatura limite de conforto térmico e isso repercute-se nos resultados obtidos para as necessidades de energia útil de arrefecimento, onde por inerência é necessária uma maior quantidade de energia para manter os gabinetes dentro da gama de temperaturas de conforto térmico. Tendo em conta que os gabinetes em estudo não possuem à data nenhum sistema de climatização para efeito de arrefecimento, presume-se com este

resultado que durante a estação de arrefecimento os gabinetes permaneçam, com alguma frequência, a uma temperatura interior ambiente acima dos 25°C.

Referentemente aos resultados obtidos resultantes das medidas de intervenção para a substituição do envidraçado original é possível observar que: i) a aplicação do vidro Duplo incolor produz uma redução das necessidades de energia útil de arrefecimento na ordem dos 3 kWh/m²/ano nos gabinetes de Dermatologia (Oeste) e Psicologia (Este) e na ordem dos 4.25 kWh/m²/ano e dos 0.7 kWh/m²/ano nos gabinetes cuja fachada exterior está orientada a Sul e Norte, respetivamente. No que diz respeito à estação de aquecimento, a introdução deste envidraçado não produz alterações de necessidades de energia útil de aquecimento de relevância; ii) a aplicação do vidro duplo cinzento produz uma redução das necessidades de energia útil de arrefecimento na ordem dos 12.55 kWh/m²/ano e de 14.31 kWh/m²/ano nos gabinetes de Dermatologia (Oeste) e Psicologia (Este), e na ordem dos 15.10 kWh/m²/ano e dos 5.08 kWh/m²/ano nos gabinetes cuja fachada exterior está orientada a Sul e Norte, respetivamente. No entanto, na estação de aquecimento, à exceção do gabinete Norte, onde o valor se mantém, este envidraçado confere aos restantes gabinetes um desempenho térmico um pouco mais fraco onde as necessidades de energia útil de aquecimento aumentam na ordem dos 2 kWh/m²/ano para os gabinetes de Dermatologia e Psicologia e de 1.41 kWh/m²/ano para o gabinete cuja fachada exterior está orientada a Sul. Ainda assim, como se verá de seguida, o balanço entre as necessidades de energia útil na estação de aquecimento e arrefecimento é positivo e esta solução apresenta resultados um pouco melhores do que o vidro duplo incolor; iii) a aplicação do vidro duplo de Baixa emissividade produz um efeito quer nas necessidades de energia útil de aquecimento, quer nas necessidades de energia útil de arrefecimento, análogo ao efeito produzido pela aplicação do vidro duplo incolor. Para os quatro gabinetes em estudo os resultados apenas apresentam uma ligeira diferença na ordem de 0.5 - 5 kWh/m²/ano para as necessidades de energia útil em ambas as estações; iv) a aplicação do vidro duplo refletivo produz, face à situação original, uma redução significativa nas necessidades de energia útil de arrefecimento em todos os gabinetes em análise. Para esta estação é mesmo o envidraçado que confere aos quatro gabinetes um melhor desempenho térmico. Para os gabinetes de Dermatologia (Oeste), de Psicologia (Este), e com a fachada exterior exposta a Norte e a Sul a redução das necessidades de energia útil de arrefecimento é de 23.15 kWh/m²/ano, 26.28 kWh/m²/ano, 9.45 kWh/m²/ano e 27.31 kWh/m²/ano, respetivamente, representando em todos os casos uma redução superior a 50%. Contudo, a característica refletiva do vidro repercute-se negativamente na estação de aquecimento. Comparativamente aos outros envidraçados em estudo, este tipo de envidraçado reflete uma maior quantidade de radiação solar. Consequentemente, os ganhos solares são menores e por isso na estação de aquecimento os gabinetes apresentam, face aos outros envidraçados em estudo e à situação original, um pior comportamento térmico com este tipo de envidraçado.

Deste modo, é possível concluir que independentemente da orientação solar da fachada exterior, dos envidraçados em análise, o Duplo refletivo é aquele que confere aos gabinetes um melhor desempenho térmico na estação de aquecimento e o Duplo de Baixa emissividade, embora com muito menos expressão, é o envidraçado que lhes confere um melhor comportamento térmico na estação de aquecimento.

Tendo em conta as 4 medidas de intervenção para a substituição do envidraçado acima mencionadas e com o fim de seleccionar aquela que confere aos gabinetes em estudo um melhor desempenho térmico, foi realizado um balanço anual entre as necessidades de energia útil na estação de aquecimento e as necessidades de energia útil na estação de arrefecimento. O referido balanço foi efetuado através do cálculo da energia total anual apresentado na expressão seguinte:

$$Energia\ final\ anual = \frac{N_{ic}}{COP} + \frac{N_{vc}}{EER} \quad [kWh / m^2 / ano] \quad (7.1)$$

onde COP (valor de coeficiente de desempenho) e EER (rácio de eficiência energética) tomam os valores de 3.6 e 3.2 respetivamente (REH - Tabela I.11 - Classificação do desempenho de unidades split, multissplit, VRF e compactas, com permuta ar-ar), considerando que o sistema de AVAC fictício admitido é do tipo multisplit [41].

Apresenta-se na Figura 7.8 os resultados da energia total anual para a situação original e para as quatro medidas de intervenção, para os gabinetes cujas fachadas exteriores estão orientadas a Oeste (Gab. Dermatologia), Este (Gab. Psicologia), Norte e Sul.

Como se pode observar na Figura 7.8, face ao atual consumo a aplicação do vidro duplo incolor permite uma redução da energia final anual de 7% para o gabinete Oeste, de 6% para o gabinete Este, de 7% para o gabinete Norte e de 10% para o gabinete Sul. É a solução que apresenta um resultado que embora seja positivo é o menos relevante comparativamente às outras soluções simuladas. A aplicação do vidro duplo cinzento permite uma poupança de energia na ordem dos 26%, 27%, 33% e 16% para os gabinetes pela ordem acima apresentada (Oeste, Este, Sul e Norte). Como a análise quer das necessidades de energia útil de aquecimento quer das necessidades de energia útil de arrefecimento permitia antever, a aplicação do vidro Duplo de baixa emissividade permitirá uma redução da energia total anual pouco melhor que a poupança potenciada pela a aplicação do vidro duplo incolor. A referida poupança de energia é de 16% para os gabinetes de Dermatologia (Oeste) e de Psicologia (Este) e de 22% e de 13% para os gabinetes cujas fachadas exteriores estão orientadas a Sul e Norte. Salienta-se ainda que para este último gabinete, cuja fachada exterior está orientada a Norte, a aplicação deste envidraçado potencia uma economia análoga à poupança de energia resultante da aplicação do vidro Duplo cinzento (16%). O vidro Duplo Refletivo é a solução que apresenta melhores resultados para os quatro gabinetes em estudo. A aplicação deste envidraçado permitirá uma redução da energia total anual na ordem dos 42%, 44%, 51% e 24% para os gabinetes cujas fachadas exteriores estão orientadas a Oeste, Este, Sul e Norte, respetivamente.

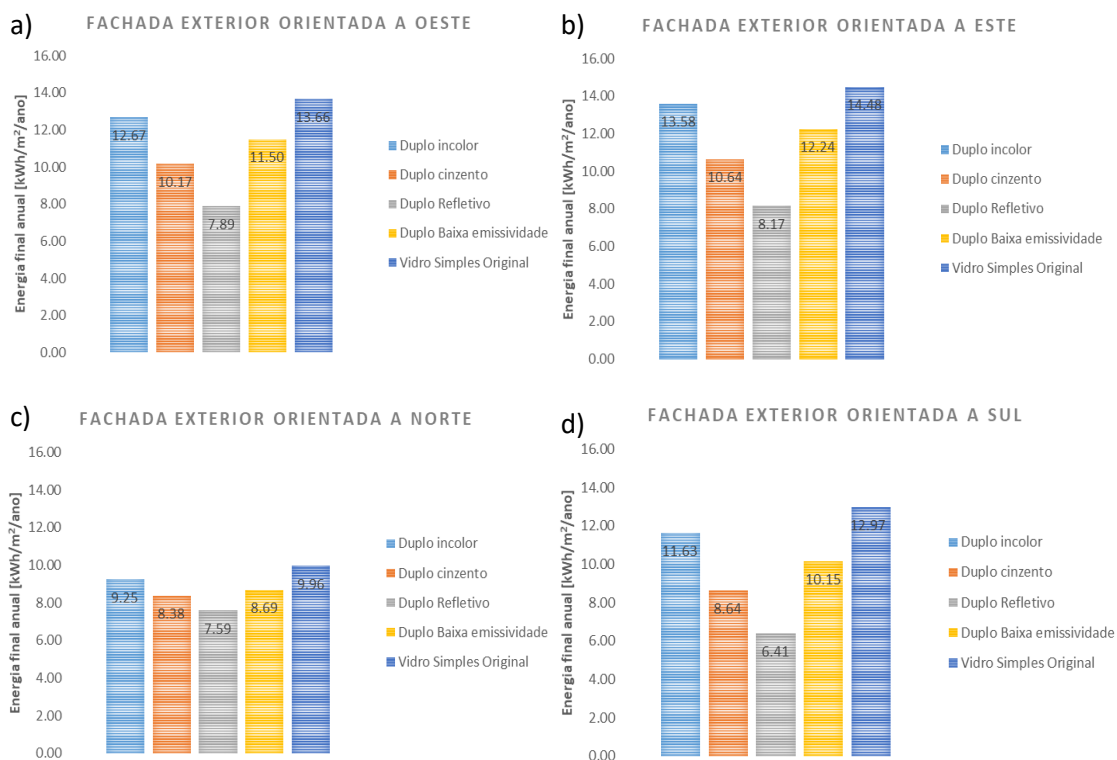


Figura 7.8 - Energia total anual consumida no gabinete quando aplicados os 4 envidraçados em estudo para: a) fachada exterior orientada a Oeste; b) fachada exterior orientada a Este; c) fachada exterior orientada a Norte; d) fachada exterior orientada a Sul.

Pelo exposto, é possível concluir que, face ao consumo atual, a poupança de energia resultante da aplicação dos quatro envidraçados em estudo depende das condições de exposição à radiação solar da fachada exterior de cada gabinete. Com efeito, os resultados das simulações demonstram que para qualquer uma das medidas de intervenção analisadas, é no gabinete com os maiores ganhos solares (fachada exterior orientada a Sul) que a poupança de energia total anual é maior. Naturalmente, por oposição, no gabinete cuja fachada exterior está orientada a Norte, onde os ganhos são consideravelmente inferiores, as poupanças são significativamente menores quando comparadas com as anteriores. No que diz respeito aos gabinetes de Dermatologia (Oeste) e Psicologia (Este), as poupanças resultantes da aplicação de diferentes tipos de envidraçados são idênticas, fruto das condições de exposição solar da fachada exterior, que em termos diários têm irradiâncias da mesma ordem de grandeza, apesar de terem a incidência de radiação direta em períodos diferentes do dia (de manhã a Este e à tarde a Oeste). Deste modo, estes resultados confirmam que o ambiente térmico dos gabinetes é fortemente influenciado pela radiação solar que incide na fachada exterior e por isso, tendo presente que a área de envidraçado representa 33% da área de fachada de cada gabinete, um vidro com propriedades refletivas capazes de repelir eficazmente os raios UV revelou ser a solução que potencia um melhor desempenho térmico dos gabinetes em estudo.

7.2.2 Envolvente opaca

Tendo presente a idade do edifício Dr. Francisco Gentil e atendendo ao facto de que toda a sua envolvente opaca está, à data, desprovida de qualquer tipo de isolamento térmico, optou-se neste trabalho por estudar o potencial de reabilitação energética resultante da aplicação de isolamento térmico na fachada exterior dos gabinetes em estudo. De entre as várias soluções para isolamento disponíveis no mercado atual, optou-se por estudar a implementação de uma placa de poliestireno extrudido (XPS) aplicado pelo interior e também pelo exterior. Com efeito, procedeu-se, dentro dos moldes descritos anteriormente, às respetivas alterações no programa de simulação, e foram efetuadas várias simulações com diferentes espessuras de isolamento. No que diz respeito ao isolamento pelo interior, salienta-se o facto de que o mesmo foi aplicado sempre com a mesma espessura quer na “Parede fina”, quer na “Parede espessa”, mantendo a morfologia da superfície interior da parede da fachada exterior. Recordando que a espessura da “Parede espessa” é consideravelmente superior à espessura da “Parede fina”, quer isto dizer que o isolamento na “Parede fina” não foi rematado à face com o isolamento da “Parede espessa”. Por outro lado, no que se refere à aplicação do isolamento pelo exterior, como a superfície exterior da “Parede fina” coincide com a superfície exterior da “Parede espessa” o isolamento foi aplicado à face, não havendo nenhum “desnível” entre as mesmas.

A fim de analisar o potencial de economia da energia total anual do gabinete, respeitante à aplicação do isolamento, foram efetuadas simulações para a aplicação do mesmo, pelo interior e pelo exterior, para as espessuras de 2 a 10 cm. Apresenta-se, na Figura 7.9, os resultados obtidos para as referidas simulações. Ressalva-se ainda que esta análise foi realizada apenas para o gabinete de Dermatologia cuja fachada exterior está orientada a Oeste.

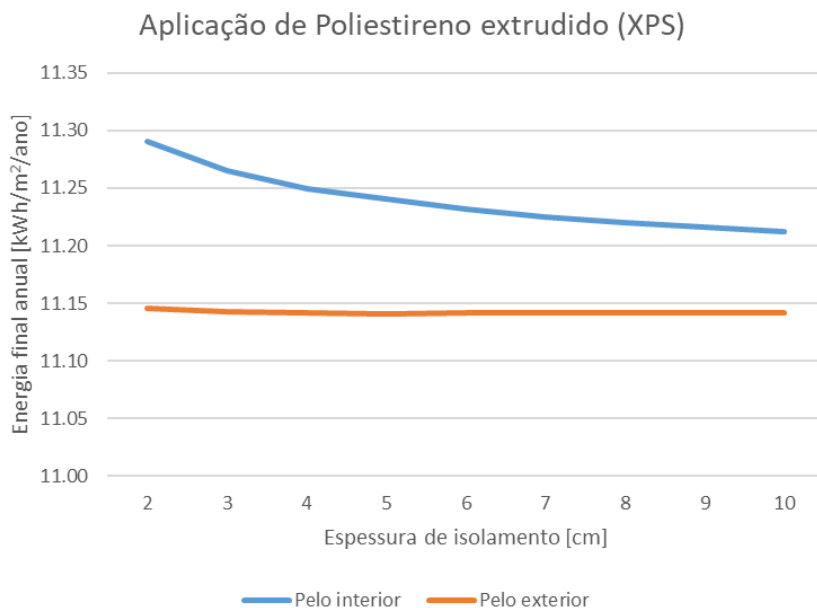


Figura 7.9 - Energia total anual consumida no gabinete de Dermatologia quando aplicado um isolamento de XPS pelo interior e pelo exterior.

Como se pode observar na Figura 7.9, comparativamente à situação original em que o gabinete tem um consumo anual de 13.66 kWh/m²/ano, a poupança de energia resultante da aplicação de uma placa de XPS com 2 cm de espessura é de 2.37 kWh/m²/ano quando aplicada pelo interior e de 2.51 kWh/m²/ano quando aplicada pelo exterior. Embora a economia para ambos os casos seja da mesma ordem de grandeza, no caso em que o isolamento é aplicado pelo exterior os resultados são um pouco melhores, como seria de esperar. Recordando a análise do subcapítulo anterior, o desempenho térmico do gabinete é fortemente influenciado pela radiação solar que incide na fachada exterior e anualmente as necessidades de energia útil na estação de arrefecimento são consideravelmente superiores às necessidades de energia útil na estação de aquecimento. Quando o isolamento é aplicado pelo exterior, este funciona como barreira térmica à energia exterior proveniente da radiação solar, conferindo à parede em que está aplicado uma gama de temperaturas mais baixa e conseqüentemente menores necessidades de energia útil de arrefecimento para manter o conforto térmico no gabinete. Por oposição, quando aplicado pelo interior a barreira térmica à energia proveniente pelo exterior não existe e a parede acaba por ficar sujeita a uma gama de temperaturas mais alta. De facto, com esta solução será mais fácil atingir uma temperatura ambiente de conforto, mas também as necessidades de energia útil na estação de arrefecimento para a manter serão um pouco maiores.

No que diz respeito às demais simulações, quer na situação em que o isolamento é aplicado pelo interior, quer na situação em que o mesmo é aplicado pelo exterior, a economia de energia total anual consumida pelo gabinete aumenta à medida que se vai aumentando a espessura de isolamento. No entanto este acréscimo, mais visível na primeira situação do que na segunda, é muito pequeno e no limite para a espessura de 10cm é de 2.45 kWh/m²/ano e de 2.51 kWh/m²/ano no caso do isolamento pelo interior e pelo exterior, respetivamente. Salienta-se o facto de que na situação de isolamento pelo exterior, a partir de 3cm de espessura a redução de energia final anual consumida pelo gabinete é tão residual que deixa de ser relevante quando os resultados são arredondados às centésimas. Do mesmo modo, para a situação em que o isolamento é aplicado pelo interior, de 3 cm a 10 cm verifica-se um decréscimo dos valores da energia final anual pouco significante, cerca de 0.08 kWh/m²/ano entre a aplicação da espessura de 3 cm e a de 10 cm.

Deste modo, é possível concluir que aplicação de uma espessura maior em detrimento de uma mais pequena, na tentativa de melhorar ao máximo o desempenho térmico do gabinete em estudo é neste caso irrelevante. Por outro lado, e sabendo que quanto maior for a espessura da placa de isolamento mais alto é o seu preço, os resultados permitem antever que não se justificará a adoção de uma espessura de isolamento superior à espessura mínima para que os elementos da envolvente opaca cumpram os requisitos mínimos exigidos pelo REH (Regulamento de desempenho energético dos edifícios de habitação) [41]. Pelo exposto, optou-se neste trabalho por adotar, como critério de seleção, a espessura que cumprisse os requisitos mínimos estabelecidos pelo REH.

O edifício em estudo está localizado em Lisboa, e por isso a zona climática de inverno e verão são I1 e V3 respetivamente. O valor do coeficiente de transmissão térmica para a envolvente opaca de acordo com a tabela I.01 - Coeficientes de transmissão térmica superficiais de referência de elementos opacos e de vãos envidraçados - do REH, é de 0.5 W/m².°C para elementos verticais [41].

Tendo em conta que os valores do coeficiente de transmissão térmica calculados para as paredes fina e espessa (U_{pe}) no subcapítulo 5.1.3 são 2.4 W/m².°C e 1.65 W/m².°C respetivamente, a espessura mínima a adotar para o isolamento (XPS com λ=0.035 W/m°C) foi calculada através da seguinte expressão.

Parede espessa:

$$U_{ref} = 0.5 = \frac{1}{\frac{1}{U_{pe}} + \frac{espessura\ do\ isolamento\ XPS\ [m]}{\lambda\ do\ isolamento\ XPS\ [W/m^{\circ}C]}} \leftrightarrow espessura\ do\ isolamento = 0.049\ m \quad (7.2)$$

$$onde : U_{pe} = \frac{1}{R_{si} + R_{se} + \frac{espessura\ do\ reboco\ [m]}{\lambda\ do\ reboco\ [W/m^{\circ}C]} + \frac{espessura\ da\ alvenaria\ de\ pedra\ [m]}{\lambda\ da\ alvenaria\ de\ pedra\ [W/m^{\circ}C]} + \frac{espessura\ do\ reboco\ [m]}{\lambda\ do\ reboco\ [W/m^{\circ}C]}}$$

Parede fina:

$$U_{ref} = 0.5 = \frac{1}{\frac{1}{U_{pf}} + \frac{espessura\ do\ isolamento\ XPS\ [m]}{\lambda\ do\ isolamento\ XPS\ [W/m^{\circ}C]}} \leftrightarrow espessura\ do\ isolamento = 0.055\ m \quad (7.3)$$

$$onde: U_{pf} = \frac{1}{R_{si} + R_{se} + \frac{espessura\ do\ reboco\ [m]}{\lambda\ do\ reboco\ [W/m^{\circ}C]} + \frac{espessura\ do\ tijolo\ maciço\ [m]}{\lambda\ do\ tijolo\ maciço\ [W/m^{\circ}C]} + \frac{espessura\ do\ reboco\ [m]}{\lambda\ do\ reboco\ [W/m^{\circ}C]}}$$

Pode assim concluir-se que para a solução construtiva da fachada exterior cumprir os requisitos mínimos do REH, a espessura mínima de isolamento a adotar é de 6 cm. Com efeito e tendo em conta que a adoção de uma espessura superior a 6cm não potencia uma economia de energia relevante, selecionou-se neste trabalho a implementação de 6cm de isolamento de XPS a aplicar pelo exterior, como a melhor medida de intervenção referente à parte opaca da fachada e que será no capítulo seguinte combinada com os envidraçados que potenciaram um melhor desempenho térmico aos gabinetes em estudo. Importa ainda referir que como os resultados para a energia final anual resultantes da aplicação desta medida foram tão próximos optou-se, para efeitos de análise da espessura a adotar para o isolamento, realizar este estudo só em relação ao gabinete de Dermatologia (Oeste).

7.2.3 Impacto da combinação das intervenções

Na sequência das análises realizadas, optou-se por estudar o efeito produzido no desempenho térmico dos gabinetes pela aplicação de dois conjuntos de medidas de intervenção que combinam a implementação do isolamento de poliestireno extrudido (XPS) e a substituição do envidraçado original por um envidraçado com melhores propriedades térmicas. Com efeito, optou-se por selecionar para ambos os conjuntos a

aplicação pelo exterior de uma placa de poliestireno extrudido de 6 cm. Tendo em conta o estudo realizado anteriormente, foi selecionada a espessura mínima para que a fachada exterior cumprisse os requisitos térmicos mínimos do REH, uma vez que, quer por razões de economia de energia total anual, quer por razões económicas não se justifica a seleção de uma espessura superior. A respeito da outra medida de intervenção que completa os conjuntos, foram selecionados para a substituição do envidraçado original os dois envidraçados que apresentaram melhores resultados em termos de energia anual consumida, ou seja, os dois envidraçados que conferiram um melhor desempenho térmico aos gabinetes em estudo. Deste modo, no primeiro conjunto, denominado conjunto A, é combinado a aplicação pelo exterior de uma placa de isolamento de poliestireno extrudido (XPS) de 6 cm com o envidraçado “Duplo Refletivo”, ao passo que no segundo conjunto, denominado conjunto B, combinou-se a aplicação pelo exterior de uma placa de poliestireno extrudido (XPS) de 6 cm com a implementação do envidraçado “Duplo Cinzento”.

Efetuada as simulações, os resultados serão analisados de seguida em termos de necessidades de energia útil de aquecimento (Nic) e necessidades de energia útil de arrefecimento (Nvc) comparativamente à situação original e por último será feito o balanço anual em termos de energia final anual, analisando o potencial de economia energética da combinação das duas medidas de intervenção face ao atual consumo dos gabinetes. Apresenta-se na figura 7.10 os valores para as necessidades de energia útil na estação de aquecimento e arrefecimento para a situação original e para a situação em que são aplicados os conjuntos A e B de medidas de intervenção, nos quatro gabinetes em estudo.

Como se pode observar na Figura 7.10, face à situação original a aplicação dos dois conjuntos de medidas de intervenção em análise reduz as necessidades de energia útil de arrefecimento conferindo a todos os gabinetes em estudo um melhor desempenho térmico nesta estação. Por outro lado, na estação de aquecimento, com exceção do gabinete cuja a fachada exterior está orientada a Norte, as necessidades de energia útil aumentam ligeiramente. No que diz respeito à estação de arrefecimento a aplicação do conjunto A apresenta melhores resultados do que a aplicação do conjunto B. Com efeito, a aplicação do primeiro conjunto de medidas promove uma redução das necessidades de energia útil de 24.32 kWh/m²/ano, 29.20 kWh/m²/ano, 9.6 kWh/m²/ano e 29.16 kWh/m²/ano para os gabinetes cujas fachadas exteriores estão orientadas a Oeste, Este, Norte e Sul, respetivamente. Por sua vez, a redução das necessidades de energia útil de arrefecimento promovida pela aplicação do conjunto B é, pela mesma ordem apresentada, de 13.02 kWh/m²/ano, 16.91 kWh/m²/ano, 4.78 kWh/m²/ano e 16.71 kWh/m²/ano. Deste modo, os resultados demonstram que nesta estação o conjunto A confere a todos os gabinetes um melhor desempenho com maior relevância nos gabinetes de Dermatologia (Oeste), de Psicologia (Este) e no gabinete cuja fachada exterior está orientada a Sul, onde a poupança de energia ultrapassa os 65%. À exceção do gabinete cuja fachada exterior está orientada a Norte, a aplicação dos dois conjuntos de medidas de intervenção nos gabinetes em estudo produz um efeito negativo, aumentando as necessidades de energia útil na estação de aquecimento. Promovendo um acréscimo de 0.32 kWh/m²/ano, 1.21 kWh/m²/ano e 1.29 kWh/m²/ano para os gabinetes de Dermatologia (Oeste), de Psicologia (este) e Sul o conjunto B revela ser uma melhor solução para esta estação comparativamente ao conjunto A, que

promove um aumento das necessidades de energia útil nesta estação de 4.16 kWh/m²/ano, 6.22 kWh/m²/ano e 7.92 kWh/m²/ano para os gabinetes apresentados pela ordem acima referida. No que se refere ao gabinete cuja fachada exterior está orientada a Norte, também é o conjunto B que proporciona um melhor desempenho térmico. Da aplicação deste conjunto, resulta uma redução das necessidades de energia útil nesta estação em 2.04 kWh/m²/ano, ao passo que da aplicação do conjunto A resulta um ligeiro aumento da mesma energia de 0.02 kWh/m²/ano.

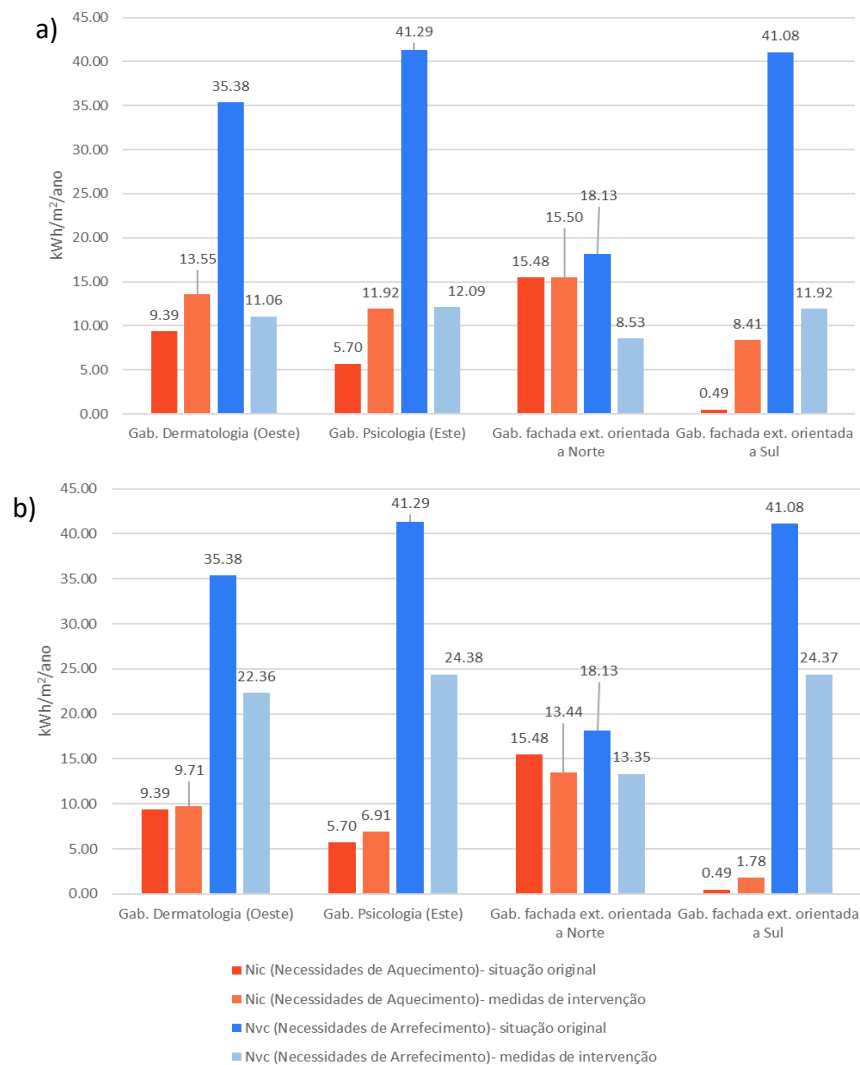


Figura 7.10 - Necessidades de energia útil de Aquecimento e Arrefecimento dos 4 gabinetes em estudo para o caso original e para a situação em que é aplicado: a) o conjunto A de medidas de intervenção; b) o conjunto B de medidas de intervenção.

Pelo exposto, é possível concluir que, se por um lado o conjunto A é o conjunto de medidas com melhores resultados no que respeita à redução das necessidades de energia útil na estação de arrefecimento para todos os gabinetes em estudo, por outro, o conjunto B é o conjunto de medidas com melhores resultados na estação de aquecimento. Com a exceção do gabinete Norte, onde a aplicação do conjunto B promove

uma redução das necessidades de energia útil e a aplicação do conjunto A promove um acréscimo ligeiro da referida energia, para os restantes gabinetes ambos os conjuntos de medidas de intervenção apresentam resultados negativos, isto é, promovem um aumento das necessidades de energia útil face à situação original.

À semelhança do realizado nos estudos das intervenções aplicadas individualmente, apresenta-se na Figura 7.11 o balanço anual entre as necessidades de energia útil para ambas as estações.

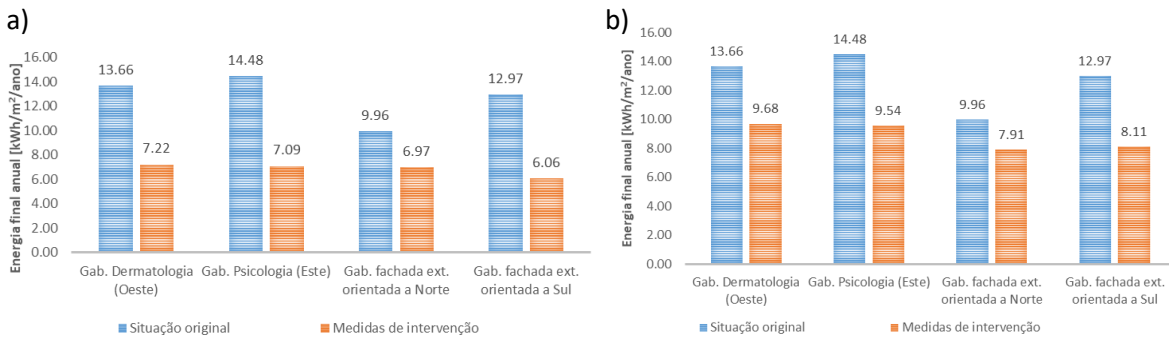


Figura 7.11 - Energia final anual consumida nos 4 gabinetes em estudo para o caso original e para a situação em que é aplicado: a) o conjunto A de medidas de intervenção; b) o conjunto B de medidas de intervenção.

Os resultados quantificados em termos de energia final anual permitirão quantificar, face à situação original, a economia energética promovida pela aplicação dos conjuntos de medidas de intervenção. Com efeito, ao observar a Figura 7.11, é possível concluir que o conjunto A é aquele cujas medidas de intervenção conferem a todos os gabinetes um melhor desempenho energético. Os resultados demonstram que o efeito negativo produzido nos consumos energéticos na estação de aquecimento é equilibrado com uma redução significativa dos mesmos na estação de verão e por isso o balanço anual é bastante positivo. A economia de energia quando aplicado este conjunto de medidas de intervenção é de 47% para o gabinete de Dermatologia (Oeste), de 51% para o gabinete de Psicologia (Este), de 30% e de 53% para os gabinetes cujas fachadas estão orientadas a Norte e a Sul, respetivamente. À semelhança do que sucedeu na análise dos envidraçados, a aplicação deste conjunto de medidas tem uma maior relevância, isto é, produz um melhor efeito nos gabinetes cujos os ganhos solares são maiores.

Os valores de energia total anual resultantes da aplicação do conjunto B, embora ligeiramente inferiores, são igualmente positivos. A poupança de energia resultante da aplicação deste conjunto de medidas de intervenção é de 29%, 34%, 21% e 38% para os gabinetes cujas fachadas exteriores estão orientadas a Oeste, Este, Norte e Sul, respetivamente. Mais uma vez, em todos os gabinetes em análise a considerável redução das necessidades de energia útil compensa o efeito negativo produzido na estação de Verão. No entanto, o balanço entre os consumos nas duas estações é menos positivo quando comparado com o balanço do conjunto A.

Deste modo, optou-se neste trabalho por adotar o conjunto A como o melhor conjunto de medidas de intervenção a aplicar em todos os gabinetes em estudo e com o qual será no subcapítulo seguinte analisada a proposta de intervenção para a cobertura.

Para melhor compreender estes resultados, e com o fim de perceber se a aplicação deste conjunto de medidas de intervenção revela ser uma boa opção do ponto vista económico, foi calculado o Período de Retorno Simples para as intervenções sugeridas. O referido parâmetro de análise - o período de tempo em que na economia de energia final anual resultante da aplicação desta medida de intervenção se recupera o investimento inicial para a implementação da mesma - foi calculado através da seguinte expressão:

$$PRS = \frac{\text{Custo XPS (6cm)} \times \text{Afachada} + \text{Custo envidraçado} \times \text{Aenvidraçado}}{\text{Custo de energia} \times (\text{Qsituação original} - \text{Qaplicação intervenções}) \times \text{Apavimento}} \quad (7.4)$$

onde:

- $\text{Custo}_{\text{XPS (6cm)}}$: Custo de uma placa de poliestireno extrudido de 6 cm (6.23 €/m²) obtido no site “Orçamentos e Orçamentação para a construção civil” [42];
- Afachada : Área de parte opaca da fachada (m);
- Aenvidraçado : Área do envidraçado (m);
- Apavimento : Área do pavimento (m);
- $\text{Q}_{\text{situação original}}$: Energia final anual (kWh/m²/ano) consumida no gabinete na situação original;
- $\text{Q}_{\text{aplicação intervenções}}$: Energia final anual (kWh/m²/ano) consumida no gabinete após a aplicação das medidas de intervenção;
- Custo de energia : Custo de 1kWh (€/kWh) foi retirado do site comercial da EDP [43] admitindo uma potência contratada de 3,45 kVA - 0.1598 €/kWh;
- $\text{Custo do envidraçado}$: Custo do envidraçado Duplo refletivo (vidro incolor 4 mm/caixa de ar 16 mm/vidro refletivo 6 mm) segundo o orçamento da empresa Strualbi.Lda - 85 €/m².

Apresenta-se na Tabela 7.1 e na Figura 7.12 os resultados do período de retorno para a aplicação das medidas de intervenção para os quatro gabinetes em estudo. Atendendo ao facto de o edifício ser constituído por vários gabinetes sujeitos a diferentes exposições solares e por isso com valores de energia final anual diferentes, foi calculado posteriormente o período de retorno simples final com base numa ponderação tendo em conta a área de pavimento que os gabinetes ocupam. Salienta-se ainda que os custos apresentados referentes às medidas de intervenção adotadas para a envolvente opaca não contemplam os acabamentos finais e os necessários ajustes impostos pelas características arquitetónicas do edifício.

Tabela 7.1 - Período de Retorno Simples para a aplicação do conjunto A de medidas de intervenção.

Gabinete cuja fachada está orientada a:	Período de Retorno Simples (anos)	Percentagem de área de pavimento	Período de Retorno Simples (anos)
Oeste	16.9	45.70%	7.71
Este	14.7	43.60%	6.41
Norte	36.4	4.10%	1.49
Sul	15.7	6.60%	1.04
Período de Retorno Simples Final (anos)			16.66

Como se pode observar na Figura 7.12, o período em que a economia de energia compensa o investimento inicial correspondente à aplicação das medidas de intervenção em estudo é de 16.66 anos. Devido ao custo dos materiais em causa, nomeadamente o custo do envidraçado, o período de retorno simples final é um pouco elevado. Embora cada caso de reabilitação tenha as suas especificidades próprias, que tornam difícil a extrapolação de resultados para outros casos, é curioso constatar que os períodos de retorno simples referidos noutros trabalhos para medidas de reabilitação energética em hospitais são igualmente elevados e da mesma ordem de grandeza do obtido neste trabalho [24, 27]. No entanto, quer a economia de energia resultante da aplicação deste conjunto de medidas de intervenção, quer a contribuição que dela resulta para a preservação do meio ambiente, são vantagens que fazem deste conjunto de medidas de intervenção uma boa proposta de reabilitação energética para o edifício dr. Francisco Gentil.

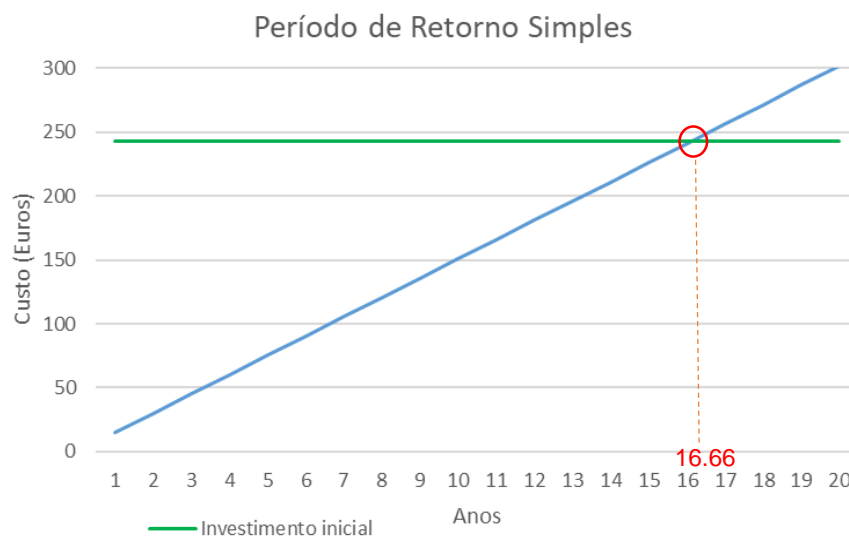


Figura 7.12 - Período de Retorno Simples Final

7.3 Piso de cobertura

7.3.1 Impacte da combinação das intervenções

Uma vez selecionado o conjunto de medidas de intervenção a aplicar na fachada exterior de todos os gabinetes em estudo, analisa-se no presente subcapítulo a combinação do conjunto A com uma proposta de intervenção para a cobertura. Com efeito, embora o objetivo principal deste trabalho seja a análise do gabinete de Dermatologia e do gabinete de Psicologia localizados no 2º piso (piso intermédio) do edifício Dr. Francisco Gentil, devido ao facto de o mesmo conter gabinetes semelhantes no último piso cuja cobertura é em terraço acessível, optou-se por simular e analisar uma proposta de intervenção para a cobertura com o fim de completar este estudo e cobrir todas as condições a que os gabinetes com esta geometria estão sujeitos. No presente caso, nos gabinetes deste último piso também ocorrem fluxos de calor através da cobertura e por isso foi necessário proceder às devidas alterações no programa. Com efeito, a condição da inexistência de trocas de calor através da cobertura deixa neste caso de ser válida e por isso no subgrupo “*Building Surface Detailed*” do ficheiro IDF, a opção de “*Adiabatic*” anteriormente definida para o elemento “Tecto” foi alterado para “*Outdoors*”, sendo também selecionada a opção de exposição deste elemento ao sol (“*SunExposed*”) e ao vento (“*WindExposed*”). Sendo a solução construtiva da cobertura do edifício constituída por (do interior para o exterior) uma camada de estuque (1 cm), uma laje de betão armado (12 cm), uma camada de forma em Betão leve e um revestimento de ladrilhos cerâmicos (2 cm), optou-se por analisar como a medida de intervenção a aplicação de uma placa de poliestireno extrudido pelo exterior. A solução proposta é constituída por (do interior para o exterior) uma camada de estuque (1 cm), uma laje de betão armado (12 cm), uma camada de poliestireno extrudido, uma camada de forma em betão leve (7 cm) e um revestimento de ladrilhos cerâmicos (2 cm). Quer isto dizer que à exceção da introdução da placa de poliestireno extrudido cuja espessura a aplicar será objeto de análise neste trabalho, toda a morfologia da solução original é mantida. Apresenta-se na Tabela 7.2 as condutibilidades térmicas dos referidos materiais.

Tabela 7.2 – Condutibilidades térmicas dos materiais constituintes da cobertura.

Material	Condutibilidade térmica [W/m.°C]
Estuque (1 cm)	0.3
Betão armado (12 cm)	2
Poliestireno extrudido (i cm)	0.035
Betão leve (7 cm)	0.16
Ladrilhos Cerâmicos (2 cm)	1.30

A semelhança do critério utilizado para a seleção da espessura de isolamento a adotar para a fachada exterior, também neste caso foram analisadas várias espessuras com o fim de eleger aquela que conferia um melhor desempenho térmico aos gabinetes em estudo. Deste modo, foram efetuadas simulações para aplicação da placa de poliestireno extrudido com espessuras de 6 a 20 cm no gabinete de Dermatologia (Oeste). Apresenta-se na Figura 7.13 os valores de energia total anual consumida resultantes da aplicação da placa de poliestireno extrudido para as espessuras de 6 a 20 cm na cobertura do gabinete de Dermatologia.

Como se pode observar na Figura 7.13, face ao atual consumo de 16.56 kWh/m²/ano correspondente à situação original, a economia de energia resultante da aplicação de uma placa de poliestireno extrudido de 6cm com o valor de 8.66 kWh/m²/ano é bastante significativo. No entanto, e à semelhança do sucedido no estudo da espessura a adotar para a placa de poliestireno extrudido a aplicar na fachada exterior, também neste caso a economia de energia resultante do aumento da espessura da referida camada de isolamento é reduzida pelo que, mais uma vez, não se justifica a seleção de uma espessura superior à espessura exigida para este elemento horizontal cumprir os requisitos mínimos do REH. Assim, também para esta proposta de intervenção, foi selecionada a espessura mínima que cumpre os requisitos mínimos do REH.

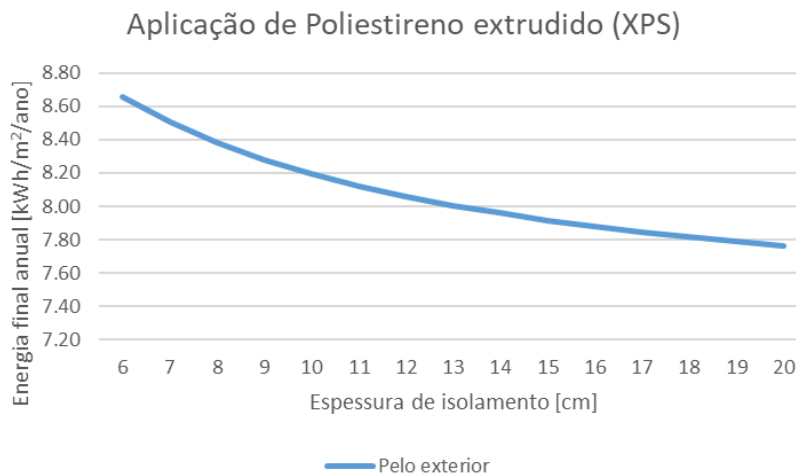


Figura 7.13 - Energia total anual consumida no gabinete de Dermatologia quando aplicado o conjunto A de medidas de intervenção na fachada exterior e um isolamento de XPS pelo exterior na cobertura.

De acordo com a tabela I.01 - Coeficientes de transmissão térmica superficiais de referência de elementos opacos e de vãos envidraçados - do REH, para a zona climática do edifício em estudo, o valor do coeficiente de transmissão térmica de referência é de 0.4 W/m².°C para elementos horizontais [41].

Deste modo e tendo em conta as condutibilidades térmicas dos materiais apresentadas na Tabela 7.2 a espessura a adotar para a placa de poliestireno extrudido foi calculada pela seguinte expressão:

$$U_{ref} = 0.4 = \frac{1}{R_{si} + R_{se} + \frac{esp.do\ estuque}{\lambda\ do\ estuque} + \frac{esp\ do\ laje\ (b.armado)}{\lambda\ bet\tilde{a}o\ armado} + \frac{esp.bet\tilde{a}o\ Leve}{\lambda\ bet\tilde{a}o\ leve} + \frac{esp.ladrilho\ cer\tilde{a}mico}{\lambda\ ladrilho\ cer\tilde{a}mico} + \frac{esp.isolamento\ XPS}{\lambda\ do\ isolamento\ XPS}} \leftrightarrow$$

$$espessura\ do\ isolamento = 0.07\ m \tag{7.5}$$

com $R_{si}=0.10 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$, $R_{se}=0.04 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$, espessura em [m] e λ em [$\text{W}/\text{m}^\circ\text{C}$].

Pode assim concluir-se que para a solução construtiva da cobertura cumprir os requisitos mínimos do REH, a espessura mínima de isolamento a adotar é de 7 cm. Com efeito e tendo em conta que a adoção de uma espessura superior a 7 cm não potencia uma economia de energia relevante, selecionou-se neste trabalho a espessura de 7 cm de isolamento de XPS a aplicar pelo exterior, como a melhor medida de intervenção referente à cobertura.

Apresenta-se de seguida, na Figura 7.14, os resultados obtidos para as necessidades de energia útil na estação de aquecimento e de arrefecimento dos quatro gabinetes em estudo, para a situação original e para a situação em que para além da aplicação do conjunto A de medidas de intervenção aplicadas na fachada exterior, é aplicado uma placa de poliestireno extrudido de 7 cm na cobertura de acordo com a solução descrita.

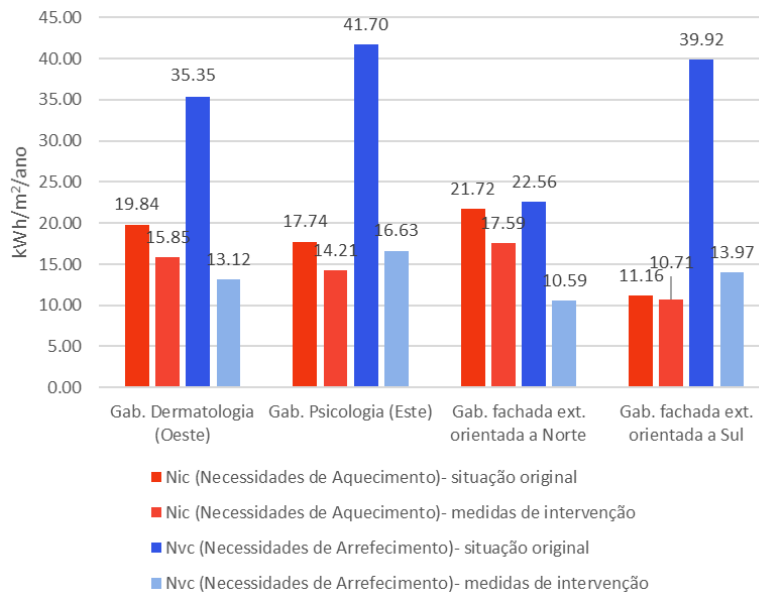


Figura 7.14 - Necessidades de energia útil de Aquecimento e Arrefecimento dos quatro gabinetes em estudo para o caso original e para a situação em que são aplicados o conjunto A de medidas de intervenção na fachada exterior e uma placa de XPS (7 cm) na cobertura.

No que diz respeito à situação original é possível observar que à semelhança dos resultados obtidos na análise dos gabinetes localizados no 2º piso (piso intermédio), com exceção do gabinete cuja fachada exterior está orientada a Norte, as necessidades de energia útil de arrefecimento, na ordem dos 35-42 kWh/m²/ano, são consideravelmente superiores às necessidades de energia útil de aquecimento, o que revela que presentemente também os gabinetes do último piso apresentam um melhor desempenho térmico na estação de aquecimento ao invés do que acontece na estação de arrefecimento, onde com maior frequência é ultrapassada a temperatura limite de conforto térmico. Importa ainda referir que comparativamente aos gabinetes do 2º piso (piso intermédio), os gabinetes em análise apresentam

necessidades de energia útil da mesma ordem de grandeza nesta estação. No que se refere à estação de aquecimento, as necessidades de energia útil dos gabinetes do último piso são consideravelmente superiores quando comparadas com as necessidades de energia útil nesta estação dos gabinetes do 2º piso (piso intermédio). A diferença é de 10.45 kWh/m²/ano e de 12.04 kWh/m²/ano para os gabinetes de Dermatologia (Oeste) e de Psicologia (Este), e de 6.24 kWh/m²/ano e 10.67 kWh/m²/ano para os gabinetes cujas fachadas estão orientadas a Norte e a Sul, respetivamente. Pelas mesmas razões referidas anteriormente, também no último piso os resultados obtidos quer para as necessidades de energia útil de aquecimento quer para as necessidades de energia útil de arrefecimento são semelhantes, nos casos em que a fachada exterior está orientada a Este e a Oeste. Na estação de aquecimento, se o gabinete cuja fachada exterior está orientada a Sul é o que apresenta um melhor desempenho térmico, por oposição o gabinete cuja fachada exterior está orientada a Norte, que está sujeito a menores ganhos solares, é o que apresenta o desempenho térmico mais fraco. Por outro lado, na estação de arrefecimento, este gabinete é o que apresenta um melhor comportamento térmico. Referentemente aos restantes gabinetes - Gabinete de Dermatologia (Oeste), Gabinete de Psicologia (Este) e o gabinete cuja fachada exterior está orientada a Sul -, embora tenham um comportamento térmico semelhante e menos favorável, o gabinete de Psicologia (Este) é aquele que apresenta um pior desempenho na estação de arrefecimento. Salienta-se ainda que à semelhança do sucedido no 2º piso (piso intermédio), é na estação de aquecimento que os gabinetes atingem temperaturas interiores superiores à temperatura limite de conforto térmico e isso repercute-se nos resultados obtidos para as necessidades de energia útil de arrefecimento, onde por inerência é necessário um maior valor de energia para manter os gabinetes dentro da gama de temperaturas de conforto térmico.

Como se pode observar na Figura 7.14, face à situação original a aplicação das medidas de intervenção em análise reduz as necessidades de energia útil de arrefecimento, conferindo a todos os gabinetes em estudo um melhor desempenho térmico nesta estação. Com efeito, a economia de energia promovida por este conjunto de medidas é de 22.22 kWh/m²/ano e de 25.07 kWh/m²/ano para os gabinetes de Dermatologia (Oeste) e de Psicologia (Este), e de 11.97 kWh/m²/ano e 25.95 kWh/m²/ano para os gabinetes cujas fachadas exteriores estão orientadas a Norte e Sul. Como se verificou nas análises anteriores, o efeito resultante das medidas de intervenção em análise tem maior relevância nos gabinetes onde os ganhos solares são maiores e deste modo a poupança de energia, na ordem dos 65%, é maior no gabinete cuja fachada exterior está orientada a Sul. No que se refere à estação de aquecimento, embora com menos expressão, a poupança de energia resultante da aplicação destas medidas é igualmente positiva em todos os gabinetes. A referida economia é de 3.99 kWh/m²/ano, 3.53 kWh/m²/ano, 4.13 kWh/m²/ano e de 0.45 kWh/m²/ano para os gabinetes de Dermatologia (Oeste), de Psicologia (Este) e os com fachadas orientadas a Norte e a Sul, respetivamente.

Pelo exposto, os resultados revelam que a aplicação deste conjunto de medidas de intervenção promove em todos os gabinetes um melhor desempenho térmico em ambas as estações. Tendo em conta a exposição solar a que está sujeito, o gabinete cuja fachada exterior está orientada a Sul é aquele em que

se por um lado na estação de arrefecimento o efeito da aplicação das intervenções em estudo mais se faz notar, por oposição na estação de aquecimento o efeito é pouco significativo. No entanto, e como se verá de seguida, o balanço entre a economia de energia em ambas as estações é bastante positivo e este gabinete, dos quatro gabinetes em estudo, é aquele onde se consegue uma maior poupança de energia.

Apresenta-se na Figura 7.15 o balanço entre as economias de energia na estação de inverno e na estação de verão. Os resultados apresentados em termos de energia final anual permitem quantificar, face à situação original, a economia energética promovida pela aplicação dos conjuntos de medidas de intervenção.

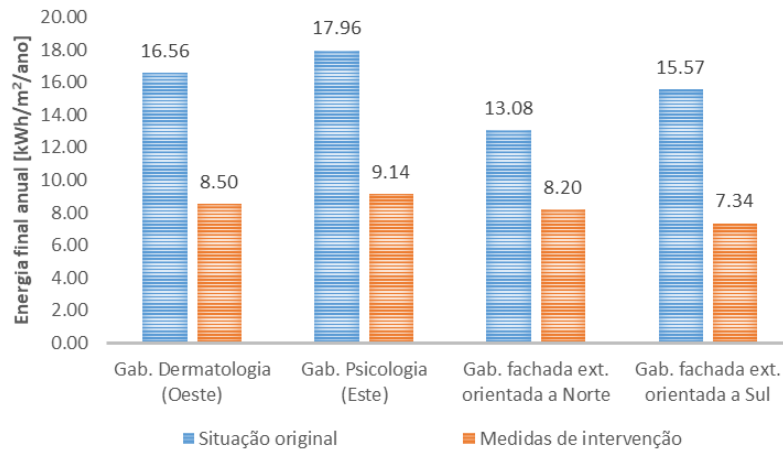


Figura 7.15 - Energia final anual consumida nos quatro gabinetes em estudo para o caso original e para a situação em que são aplicados o conjunto A de medidas de intervenção na fachada exterior e uma placa de XPS (7 cm) na cobertura.

Como se pode observar na Figura 7.15, o efeito produzido pela aplicação das medidas de intervenção quer na fachada exterior quer na cobertura promove uma redução de energia final anual bastante significativa. A economia de energia anual é de 49% para os gabinetes cujas fachadas exteriores estão orientadas a Oeste e Este e de 37% e 53% para os gabinetes cujas fachadas estão orientadas a Norte e Sul, respetivamente. Deste modo, e tendo em conta a referida economia em cada gabinete, presume-se que a substituição do envidraçado existente por um vidro duplo refletivo, bem como a aplicação pelo exterior de uma placa de poliestireno extrudido de 6 cm na fachada exterior e de outra de 7 cm na cobertura, revelam ser um conjunto de medidas de intervenção com resultados bastante satisfatórios e que podem ser considerados como uma boa proposta de reabilitação energética para o edifício Dr. Francisco Gentil do IPO de Lisboa.

À semelhança do realizado na análise do piso intermédio, também neste caso foi calculado o Período de Retorno Simples onde a expressão (7.4) foi atualizada tendo sido introduzido no numerador o custo associado à implementação de isolamento de poliestireno extrudido de 7 cm (7.26 €/m²) na cobertura.

$$PRS = \frac{\text{Custo XPS (6cm)} \times \text{Afachada} + \text{Custo XPS (7cm)} \times \text{Acobertura} + \text{Custo envidraçado} \times \text{Aenvidraçado}}{\text{Custo de energia} \times (Q_{\text{situação original}} - Q_{\text{aplicação intervenções}}) \times \text{Apavimento}} \quad (7.6)$$

Apresenta-se, na Tabela 7.3 e na Figura 7.16, os resultados do período de retorno simples para a aplicação das medidas de intervenção para os gabinetes em estudo. Recorda-se o facto de que o período de retorno simples final foi calculado com base numa ponderação tendo em conta a área de pavimento que os gabinetes ocupam.

Tabela 7.3 - Período de Retorno Simples para a aplicação das medidas de intervenção em estudo

Gabinete cuja fachada está orientada a:	Período de Retorno Simples (anos)	Percentagem de área de pavimento	Período de Retorno Simples (anos)
Oeste	19.1	45.70%	8.74
Este	17.5	43.60%	7.62
Norte	31.6	4.10%	1.29
Sul	18.7	6.60%	1.24
Período de Retorno Simples Final (anos)			18.89

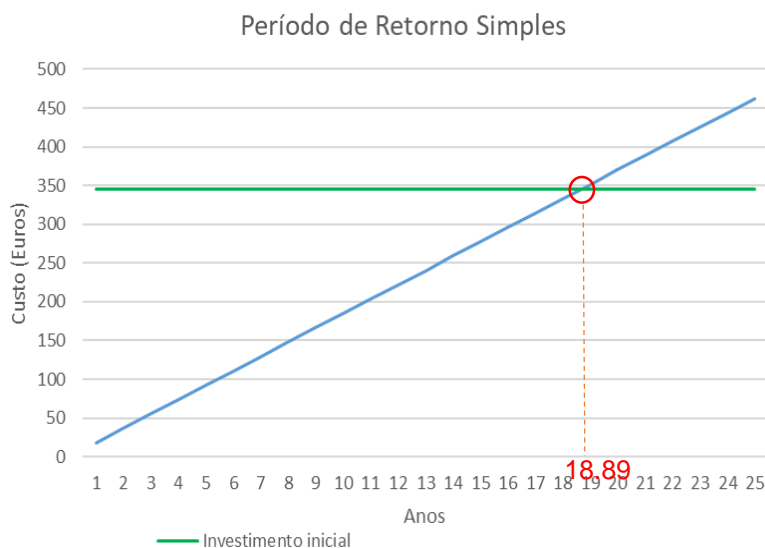


Figura 7.16 - Período de Retorno Simples Final.

Como se pode observar na Figura 7.16, o período de Retorno Simples referente ao conjunto de medidas de intervenção no último piso é de 18.89 anos. Apesar de ser elevado, devido ao custo dos materiais em causa, e ligeiramente maior do que o período de retorno simples calculado para o piso intermédio, continua em linha com os resultados obtidos por outros autores [24, 27]. Por outro lado, e ressalvando mais uma vez as vantagens associadas a este conjunto de medidas de intervenção, quer em termos de conforto e conservação de energia quer para a preservação do meio ambiente, considera-se que este conjunto de medidas de intervenção é uma boa proposta de reabilitação energética para o edifício Dr. Francisco Gentil, tornando-o mais eficiente e mais sustentável.

8. Conclusões e desenvolvimentos futuros

8.1 Conclusão

Em consequência das alterações climáticas e do contínuo aumento dos consumos energéticos, é hoje essencial a construção e a reabilitação de edifícios que primem pela conservação da energia. A implementação de novas soluções construtivas que assegurem a redução do consumo de energia nos edifícios e que controlando os parâmetros influentes no seu desempenho térmico promovam as condições necessárias a fim de satisfazer os níveis de conforto preconizados para o seu ambiente interior, assumem atualmente um grande destaque no sector da construção. Neste contexto, têm surgido políticas e fundos económicos que incentivam a construção/reabilitação de edifícios energeticamente mais eficientes e mais sustentáveis.

Os hospitais, caracterizados por altos consumos de energia, são edifícios cujo potencial de economia de energia é bastante elevado. Desta feita, a obtenção de um bom desempenho energético não descurando as condições térmicas/ambientais dos espaços interiores que assegurem o bem-estar de todos os seus intervenientes é, atualmente, de primordial importância. No presente trabalho avaliou-se por via experimental, na estação de inverno e de verão, o desempenho térmico de dois gabinetes, com exposições solares distintas, do edifício Francisco Gentil do Instituto de Oncologia de Lisboa (IPO) - o gabinete de Psicologia (Este) e o gabinete de Dermatologia (Oeste) -, a partir de registos de temperaturas, radiação solar e fluxos de calor, incidindo sobre ambientes, paredes e envidraçados.

De uma amostra relativamente extensa, foram selecionados, para uma análise detalhada, 3 dias tipo representativos do desempenho térmico dos gabinetes durante o período de inverno - o dia mais frio (DMF), o dia de menor radiação solar (DmR) e o dia em que ambos os gabinetes se encontraram climatizados (DAQ) - e 2 dias tipo representativos do desempenho térmico dos gabinetes durante a estação de verão - o dia de menor radiação (DmR) e o dia de maior radiação solar, também representativo dos dias mais quentes (DMR). Estes dias tipo foram selecionados de modo a permitir aferir o comportamento térmico dos gabinetes sob diferentes condições, tendo sido feita, posteriormente, uma análise dos resultados obtidos.

Os dados recolhidos na campanha experimental de inverno permitiram concluir que:

- A temperatura interior, para os 3 dias em análise, nunca foi inferior a 17°C em ambos os gabinetes. Por outro lado, embora a referida temperatura tenha aumentado nos períodos de maior radiação solar no DMF, e no período de funcionamento do aparelho de climatização no caso do DAQ, o seu valor médio variou entre 19.1 e 20.6°C.
- No DMF as temperaturas mais altas registadas foram de 20.9°C para o gabinete de Psicologia e de 22.6°C para o gabinete de Dermatologia, enquanto no DAQ foram de 19.9 e 22.0°C, respetivamente. Neste dia, em que ambos os gabinetes foram climatizados (DAQ), apesar da temperatura exterior ser superior à do DMF cerca de 3°C, a temperatura interior média nos dois

gabinetes foi da mesma ordem de grandeza, chegando a ser 0.6°C inferior no gabinete de Psicologia.

- Os valores da temperatura interior registados no DMF não diferiram muito dos do DAQ, apesar das condições climáticas diferentes que se verificaram nesses dias. No DmR a temperatura oscilou, em termos médios, entre os mesmos valores dos outros dois dias em análise, concluindo-se que, apesar das condições climáticas diferentes verificadas nesses dias, as temperaturas interiores não foram muito distintas e mantiveram-se, em ambos os casos, em valores aceitáveis do ponto de vista do conforto térmico.
- No que diz respeito aos fluxos de calor, nos dias em análise, todos os valores registados foram positivos, pelo que houve sempre perda de calor do interior para o exterior, com maior expressão, nas paredes, nos períodos de maior radiação solar e durante o funcionamento do sistema de climatização, e nos envidraçados, durante a noite. Relativamente aos envidraçados, quer no que toca às temperaturas superficiais quer em termos de fluxos de calor, evidenciaram um desempenho térmico com potencial de melhoria elevado, pelo que a sua substituição é recomendada.
- A análise em frequência realizada permitiu identificar periodicidades de fenómenos e caracterizar melhor intensidades de ações e respetivos efeitos, no presente trabalho apenas exemplificado para as temperaturas ambiente, revelando-se uma técnica de aplicação promissora em estudos experimentais de Térmica de Edifícios.

No que diz respeito à campanha de verão:

- Para os dois dias em análise (DmR e DMR), a temperatura interior ambiente atingiu valores mínimos semelhantes em ambos os gabinetes. No DmR as temperaturas interiores foram de 25.35 °C e de 23.34°C e no DMR as temperaturas foram de 25.48°C e de 23.86°C para os gabinetes de Dermatologia e Psicologia, respetivamente.
- As temperaturas mais altas foram registadas no DMR, tendo sido de 26.42°C e de 28.03°C para os gabinetes de Dermatologia e de Psicologia, respetivamente. Já no DmR o gabinete de Dermatologia atingiu a temperatura de 25.71°C e o gabinete de Psicologia a temperatura de 25.03°C.
- Nos dias em análise, embora a temperatura ambiente interior tenha variado, em termos médios, entre 24°C e 26°C em ambos os gabinetes, atingiu valores que, ultrapassando 25°C, se revelam, de acordo com a literatura, inadequados para o ambiente térmico em causa.
- Em ambos os dias, salvo alguns períodos nas primeiras horas onde o fluxo de calor na Parede fina do gabinete de Psicologia (Este) é negativo, havendo troca de calor do exterior para o interior, os resultados obtidos foram análogos aos da campanha de inverno. Maioritariamente houve sempre perda de calor do interior para o exterior, com maior expressão, nas paredes, nos períodos de maior radiação solar, e nos envidraçados, durante a noite.

Numa segunda fase deste trabalho elaborou-se um modelo de simulação dos mesmos gabinetes. Após a calibração do referido modelo com os resultados obtidos experimentalmente, foram efetuadas várias simulações a fim de se avaliar o impacto de um conjunto de possíveis soluções de reabilitação no desempenho energético do edifício. Embora o objeto de estudo ao longo deste trabalho tenha sido o Gabinete de Dermatologia, cuja fachada exterior está orientada a Oeste e o Gabinete de Psicologia, cuja fachada exterior está orientada a Este, optou-se também por efetuar simulações nos casos em que a fachada exterior está orientada a Sul e a Norte pois o edifício Dr. Francisco Gentil contém também alguns gabinetes similares, apesar de em menor número, sujeitos à exposição solar nestas orientações.

No que se refere às medidas de intervenção, analisou-se individualmente a aplicação na fachada, quer pelo interior quer pelo exterior, de várias espessuras de isolamento térmico em poliestireno extrudido e a substituição do envidraçado existente por quatro tipos de envidraçados diferentes. De seguida, foi avaliado o impacto da combinação destas duas medidas de intervenção de reabilitação energética dos gabinetes num piso intermédio. Por último, foi feita uma análise e proposta de reabilitação energética para a solução da cobertura analisando-se para um gabinete situado no último piso do edifício, a poupança energética resultante da combinação do melhor conjunto de medidas de intervenção na fachada exterior com uma proposta de intervenção para a cobertura onde se estudou a aplicação de XPS pelo exterior.

Relativamente à aplicação do isolamento térmico na fachada, foram efetuadas simulações para a aplicação do mesmo, pelo interior e pelo exterior, para as espessuras de 2 a 10 cm. Da análise realizada, foi possível concluir que no caso em que o isolamento de poliestireno extrudido (XPS) é aplicada pelo exterior a economia da energia final anual do gabinete é maior, mas o impacto do aumento da espessura de isolamento aplicado revelou-se pouco significativo. Por outro lado, e tendo em conta o acréscimo do custo associado à seleção de uma maior espessura de isolamento de XPS, os resultados permitiram então concluir que no presente caso de estudo não se justifica a adoção de uma espessura de isolamento superior à espessura mínima para que os elementos da envolvente opaca cumpram os requisitos mínimos (de coeficiente de transmissão térmica, $U_{máx}$) exigidos pelo REH (Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação). Pelo exposto, selecionou-se neste trabalho a implementação de 6cm de isolamento de XPS a aplicar pelo exterior, como a proposta de intervenção referente à parte opaca da fachada. A economia da energia final anual resultante desta intervenção é na ordem dos 18 %.

A respeito da medida de intervenção do envidraçado simples incolor de 3 mm existente, considerou-se a sua substituição por um envidraçado com um melhor desempenho térmico. Deste modo, foram selecionados para efeitos de análise quatro tipos de envidraçados, - um vidro duplo incolor, um vidro duplo cinzento, um vidro duplo refletivo e um vidro duplo de baixa emissividade, - todos eles duplos, de 4+16+6 mm, preenchido com ar, mas com propriedades térmicas distintas. Da análise realizada, foi possível concluir que o vidro duplo refletivo é a solução que apresenta melhores resultados para os quatro gabinetes em estudo. Embora as necessidades de energia útil no verão aumentem ligeiramente face à situação original, o balanço energético entre as duas estações é bastante positivo. A aplicação deste envidraçado

permitirá uma redução da energia total anual na ordem dos 42%, 44%,51% e 24% para os gabinetes cujas fachadas exteriores estão orientadas a Oeste, Este, Sul e Norte, respetivamente. Este resultado permite concluir que a substituição do envidraçado original permite uma economia bastante maior quando comparada com a medida de intervenção referente à aplicação de isolamento térmico na fachada exterior.

Após a análise do potencial de reabilitação energético de cada umas das medidas de intervenção aplicadas isoladamente, optou-se, de seguida, por estudar o efeito produzido no desempenho térmico dos gabinetes resultante da aplicação das duas em simultâneo, ou seja, combinando a implementação do isolamento de poliestireno extrudido (XPS) na fachada e a substituição do envidraçado original por um envidraçado com melhores propriedades térmicas. Assim, foram analisados dois conjuntos de medidas de intervenção. No primeiro conjunto, denominado conjunto A, foi combinado a aplicação pelo exterior de uma placa de poliestireno extrudido (XPS) de 6 cm com o envidraçado “duplo refletivo”, ao passo que no segundo conjunto, denominado conjunto B, foi combinado a mesma espessura de isolamento aplicada exterior com a implementação do envidraçado “duplo cinzento”. O estudo permitiu concluir que o conjunto A é aquele cujas medidas de intervenção conferem aos gabinetes, para todas as orientações solares, um melhor desempenho energético. A aplicação deste envidraçado duplo refletivo permitirá uma redução da energia total anual na ordem dos 47 %, 51 %, 53 % e 30 % para os gabinetes cujas fachadas exteriores estão orientadas a Oeste, Este, Sul e Norte, respetivamente.

Seguidamente, foi analisado o desempenho térmico dos gabinetes do último piso do edifício após a aplicação do conjunto A de medidas de intervenção e de uma placa de poliestireno extrudido (XPS) aplicado na cobertura pelo exterior. Também neste caso foi analisada a aplicação de várias espessuras (de 6 a 20 cm) na cobertura. À semelhança do sucedido na análise do impacto da espessura de XPS a aplicar na fachada exterior, os resultados permitiram igualmente concluir que a economia de energia final anual resultante da aplicação de espessuras maiores de isolamento na cobertura foi também pouco pronunciado, pelo que se optou por adotar a espessura de 7 cm que satisfaz os requisitos mínimos do REH para elementos horizontais ($U_{máx}$). A poupança de energia final resultante da aplicação do conjunto A de medidas de intervenção na fachada exterior e de 7cm de espessura de poliestireno extrudido aplicada pelo exterior na cobertura foi de 49 % para os gabinetes cujas fachadas exteriores estão orientadas a Oeste e Este e de 37 % e 53 % para os gabinetes cujas fachadas estão orientadas a Norte e Sul, respetivamente. Pelo exposto, considera-se que a substituição do envidraçado existente por um vidro duplo refletivo, bem como a aplicação pelo exterior de uma placa de poliestireno extrudido de 6 cm na fachada exterior e de 7cm na cobertura, revelam ser um conjunto de medidas de intervenção com resultados bastante satisfatórios e que podem ser considerados como uma proposta de reabilitação energética para o edifício Dr. Francisco Gentil do IPO de Lisboa.

Finalmente, e a fim de perceber o impacte económico da aplicação das medidas de reabilitação referidas anteriormente, foi calculado o período de retorno simples da aplicação da combinação destas medidas de intervenção, ou seja, o tempo em que na economia de energia final anual resultante da aplicação destas

medidas de intervenção recupera o investimento inicial para a implementação das mesmas. O período de retorno simples, calculado com base numa ponderação tendo em conta a área de pavimento que os gabinetes em estudo ocupam, foi de 16.66 anos para o piso intermédio e de 18.89 para o último piso, o que está de acordo com os resultados obtidos anteriormente por outros autores [24, 27]. Da análise efetuada, verifica-se ser o custo da substituição das janelas por outras bastante mais eficientes o fator que mais pesa no aumento do período de retorno. Se numa perspetiva exclusivamente económica (investidor não utilizador) estes períodos podem ser considerados elevados, na perspetiva do utilizador não pagador, que ganha em conforto térmico, e na perspetiva da sociedade, que ganha com a redução dos impactes ambientais, o investimento pode ser justificável.

8.2 Desenvolvimentos futuros

O presente trabalho permitiu caracterizar o comportamento térmico de gabinetes médicos da unidade hospitalar do IPO de Lisboa em tempo real por via experimental, e inferir por simulação energética o potencial energético de algumas medidas de intervenção onde se considerou a aplicação de isolamento térmico nas fachadas exteriores e cobertura e a substituição de envidraçados. Para o seguimento e aprofundamento deste estudo sugere-se como desenvolvimentos futuros:

- estudar o desempenho lumínico dos gabinetes estudados;
- analisar o potencial de reabilitação energética de outras medidas de intervenção considerando tipos de isolamento e envidraçados com propriedades térmicas diferentes das estudadas neste trabalho;
- estudar, por via da simulação numérica, o comportamento térmico dos gabinetes considerando simultaneamente o conjunto de medidas de intervenção propostas neste trabalho complementada com a influência dos dispositivos de sombreamento;
- realizar uma análise económica comparativa entre as várias soluções de envidraçados estudadas;
- estudar o impacto das medidas de reabilitação energética para o caso de estudo sujeito a outras condições climáticas (noutros países e noutras zonas climáticas em Portugal);
- estender a aplicação de uma metodologia de trabalho semelhante a outros casos de estudo de unidades hospitalares.

Referências

- [1] EU, “Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings (recast)”, Off. J. Eur. Union, pp. 13–35, 2010.
- [2] ANSI/ASHRAE Standard 55-Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE), Atlanta, GA, USA (2017)
- [3] R. Kameel, E. Khalil, “Thermal comfort VS air quality in air-conditioned healthcare applications”, 36th AIAA thermophysics conference 2003, Orland, Florida, paper no. AIAA-2003-40199 (2003).
- [4] C. A. Balaras, E. Dascalaki, A. Gaglia, “HVAC and indoor thermal comfort conditions in hospital operating rooms”, Energy and Building, 39 (2007), pp. 454-470.
- [5] C. Zhang, Raja Shahmir Nizam, Lu Tian, “BIM-based investigation of total energy consumption in delivering building products”, Advanced Engineering Informatics, Volume 38, October 2018, Pages 370-380.
- [6] K. Amasyali, M. Nora, El-Gohary, “A review of data-driven building energy consumption prediction studies”, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 81, January 2018, Pages 1192-1205.
- [7] “Edifícios e Energia”. Disponível em: <http://edificioseenergia.pt/pt/noticia/evolution-competir0712sustentavel4>, [Consultado em 26/04/2018].
- [8] D. D’Agostino, B. Cuniberti, P. Bertoldi, “Energy consumption and efficiency technology measures in European non-residential buildings”, Energy and Buildings, Volume 153, 15 October 2017, Pages 72-86.
- [9] L. M. López-González, Luis M. López-Ochoa, Jesús Las-Heras-Casas, César García-Lozano, “Final and primary energy consumption of the residential sector in Spain and La Rioja (1991–2013), verifying the degree of compliance with the European 2020 goals by means of energy indicators” Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 81, Part 2, January 2018, Pages 2358-2370.
- [10] J. Bernardo, “Estratégia para a Eficiência Energética nos Edifícios Públicos”, Disponível em: http://www.Ineg.pt/download/10887/DGEG_REPublic_ZEB%2011dez2015.pdf, [consultado a 25/03/2018]
- [11] T. Huo, H. Ren, X. ling Zhang, W. Cai, W. Feng, N. Zhou, X. Wang, “China's energy consumption in the building sector: A Statistical Yearbook-Energy Balance Sheet based splitting method”, Journal of Cleaner Production, Volume 185, 1 June 2018, Pages 665-679.
- [12] EU, “Directive (EU) 2018/844 of the European Parliament and of the Council of 30 May 2018 amending Directive 2010/31/EU on the energy performance of buildings and Directive 2012/27/EU on energy efficiency”, 2018.

[13] Aviso 25 - Eficiência energética nos edifícios". Disponível em : <http://www.pnaee.pt/images/files/aviso25/aviso25.pdf>. [consultado em 5/07/2018]

[14] Decreto nº 48358, Ministério da Saúde e Assistência, Diário do Governo n.º 101/1968, Série I de 1968-04-27, págs612 - 626.

[15] A. Buonomano, F. Calise, G. Ferruzzi, A. Palombo, "Dynamic energy performance analysis: Case study for energy efficiency retrofits of hospital buildings", *Energy*, Volume 78, 15 December 2014, Pages 555-572.

[16] T. Wang, Xiaodong Li, Pin-ChaoLiao, Dongping Fang, "Building energy efficiency for public hospitals and healthcare facilities in China: Barriers and drivers", *Energy*, Volume 103, 15 May 2016, Pages 588-597.

[17] Administração Central do Sistema de Saúde/ Relatório de monitorização trimestral de energia, água e resíduos, 2.º Trimestre de 2017, Despacho n.º 4128/2017, de 3 de maio.

[18] J. Khodakarami, N. Nasrollahi /Thermal comfort in hospitals – A literature review /Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 16, Issue 6, August 2012, Pages 4071-4077.

[19] V. De Giuli, R. Zecchina, L. Salmaso, L. Corain, M. De Carlia, "Measured and perceived indoor environmental quality: Padua Hospital case study", *Building and Environment*, Volume 59, January 2013, Pages 211-22.

[20] M. Santamouris, E. Dascalaki, C. Balaras, A. Argiriou, A. Gaglia, "Energy performance and energy conservation in health care buildings in Hellas", *Energy Conversion and Management*, 35 (4) (1994), Pages 293-305.

[21] N. Thinatea, W. Wongsapai, DetDamrongsak, "Energy Performance Study in Thailand Hospital Building", *Energy Procedia*, Volume 141, December 2017, Pages 255-259.

[22] A. González, J. García-Sanz-Calcedo, D. Rodríguez Salgado, "A quantitative analysis of final energy consumption in hospitals in Spain", *Sustainable Cities and Society*, Volume 36, January 2018, Pages 169-175.

[23] F. Ascione, N. Bianco, R. Francesca De Masi, G. Peter Vanoli, "Rehabilitation of the building envelope of hospitals: Achievable energy savings and microclimatic control on varying the HVAC systems in Mediterranean climates", *Energy and Buildings*, Volume 60, May 2013, pages 125-138.

[24] A. Carbonari, R. Fioretti, M. Lemma, P. Principi, "Managing Energy Retrofit of Acute Hospitals and Community Clinics through EPC Contracting: The MARTE Project", *Energy Procedia*, Volume 78, November 2015, Pages 1033-1038.

[25] H. M.Taleb, "Enhancing the skin performance of hospital buildings in the UAE", *Journal of Building Engineering*, Volume 7, September 2016, Pages 300-311.

- [26] A. F. Radwana, Ahmed A. Hanafy, Mohamed Elhelw, Abd El-Hamid A., El-Sayed, "Retrofitting of existing buildings to achieve better energy-efficiency in commercial building case study: Hospital in Egypt", Alexandria Engineering Journal, Volume 55, Issue 4, December 2016, Pages 3061-3071.
- [27] F. Silenzi, A. Priarone, M. Fossa, "Hourly simulations of an hospital building for assessing the thermal demand and the best retrofit strategies for consumption reduction", Thermal Science and Engineering Progress, Volume 6, June 2018, Pages 388-397.
- [28] F. Natividade, M. G. Gomes, A. M. Rodrigues, "Estudo do comportamento térmico de gabinetes médicos de unidades hospitalares na estação de aquecimento", Construção 2018 – reabilitar e construir de forma sustentável, FEUP, Lisboa, 21-23 de novembro de 2018.
- [29] D. Arnaut, "An Intangible Heritage in Use Portuguese Institute of Oncology", Docomomo Journal, 55 (2016), pp.17-23.
- [30] "A luta contra o cancro em Portugal". Disponível em : http://www.academianacionalmedicina.pt/Backoffice/UserFiles/File/Documentos/GentilMartins_ALutaContraOCancro.pdf [consultado em 20/03/2018].
- [31] Hukseflux Thermal Sensors User Manual (HFP01 and HFP03 manual v1721), September 2015
- [32] EN ISO 9869: 1994 (1994) - "Thermal insulation - Building elements - In-situ Measurement of Thermal Resistance and Thermal Transmittance".
- [33] C. Santos, J. Paiva, "Caracterização térmica de paredes de alvenaria", LNEC-ITE 12.
- [34] R. Gomes, "Condicionamentos climáticos da envolvente dos edifícios para habitação", LNEC (1962).
- [35] P. Duhamel, M. Vetterli, "Fast fourier transforms: A tutorial review and a state of the art", Volume 19, Issue 4, April 1990, Pages 259-299.
- [36] S. Cho, "Fourier Transform and Its Applications Using Microsoft Excel", Copyright 2018 Morgan & Claypool Publishers, October 2018.
- [37] "Getting Started with EnergyPlus, Basic Concepts Manual – Essential Information you need about running EnergyPlus", Copyright 1996-2015.
- [38] ASHRAE, "ASHRAE Guideline 14-2002: Measurement of Energy Demand and Savings," Am. Soc. Heating, Refrig. Air-Conditioning Eng. Atlanta, GA, USA, 2002.
- [39] IPMVP New Construction Subcommittee, "International Performance Measurement & Verification Protocol: Concepts and Options for Determining Energy Savings in New Construction - Volume III," Washington, DC, USA, vol. III, no. April, pp. 1–249, 2003.

[40] FEMP, “M&V Guidelines: Measurement and Verification for Performance-Based Contracts Version 4.0,” no. November, pp. 1–306, 2015.

[41] REH- “Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação”, Decreto Lei 118/2013 de 20 de agosto 2013; Diário da República, 2013; pp. 4988-5005, Portugal.

[42] “Orçamentos e Orçamentação para a construção civil”. Disponível em: <https://orcamentos.eu/precos-de-placas-de-poliestireno-extrudido/> [consultado em 20/01/2019].

[43] “Tarifa de eletricidade da EDP”. Disponível em : <https://lojaluz.com/fornecedores/edp/tarifas/preco-kwh> [consultado em 23/03/2019].