



Instituto Superior de Engenharia

Politécnico de Coimbra

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Otimização Energética dos Edifícios de Engenharia Mecânica e Eletromecânica do ISEC

Trabalho de Projeto para a obtenção do grau de Mestre em
Engenharia Mecânica

Especialização em Projeto, Instalação e Manutenção de Sistemas
Térmicos

Autor

Hugo Simões Martins

Orientador

Prof. Doutora Anabela Duarte Carvalho

Coimbra, janeiro, 2025



INSTITUTO POLITÉCNICO
DE COIMBRA

INSTITUTO SUPERIOR
DE ENGENHARIA
DE COIMBRA

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar os meus sinceros agradecimentos às pessoas que me apoiaram ao longo desta jornada, sem as quais este trabalho não seria possível.

Aos meus pais, Altino e Amália, pelo apoio incondicional, pela força e pela confiança que depositaram em mim ao longo deste caminho. O vosso exemplo de dedicação e sacrifício foi sempre a minha maior fonte de motivação, e por isso, sou profundamente grato.

Ao meu irmão, Tiago, que esteve sempre presente para me ouvir e apoiar, mesmo nos momentos mais desafiantes. A tua companhia e incentivo constantes fizeram toda a diferença, ajudando-me a manter o foco e o equilíbrio.

À minha namorada, Vladyslava, pelo carinho, paciência e compreensão. Obrigado por estares sempre ao meu lado, nos momentos de pressão e nos momentos de celebração. O teu apoio foi essencial para que eu conseguisse alcançar este objetivo.

À minha orientadora, Prof. Doutora Anabela, pela sua orientação precisa, dedicação e conhecimentos partilhados. A sua orientação foi fundamental para o desenvolvimento deste trabalho, e sou grato pela confiança que depositou em mim.

Por fim, aos meus colegas de curso, que partilharam comigo esta etapa. O vosso companheirismo, troca de ideias e incentivo criaram um ambiente colaborativo e de aprendizagem contínua, tornando esta jornada mais leve e enriquecedora.

RESUMO

No âmbito do Mestrado em Engenharia Mecânica - Especialização em Projeto, Instalação e Manutenção de Sistemas Térmicos, optou -se pela realização de um projeto de mestrado. Este projeto teve como objetivo principal caracterizar e analisar o desempenho energético dos edifícios de Engenharia Mecânica e de Engenharia Eletromecânica, do Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, assim como propor e fazer uma avaliação técnico-económica de medidas de aumento de eficiência energética e de integração de energias renováveis.

A crescente preocupação com a sustentabilidade e a necessidade de reduzir o consumo energético nos edifícios, nomeadamente de edifícios existentes, que ainda apresentam um grande potencial de melhoria, tornam este tipo de estudo fundamental para promover práticas mais eficientes e menos prejudiciais do ponto de vista ambiental.

O estudo iniciou com o levantamento de dados dos edifícios, nomeadamente plantas, constituição da envolvente, principais equipamentos consumidores, períodos de ocupação e de utilização de equipamentos, entre outros, para posterior criação de um modelo detalhado do edifício, utilizando o *software* CYPE de modelação dinâmica de edifícios.

Com base nos resultados obtidos, nomeadamente a nível das cargas térmicas e das necessidades de energia útil para climatização do edifício, foram identificadas as principais áreas de atuação e com potencial de melhoria. Ao longo do trabalho, foram propostas e analisadas várias soluções de melhoria, como a substituição da iluminação, a aplicação de isolamento térmico, a aplicação de palas de sombreamento, a substituição dos envidraçados, a aplicação de sistemas de climatização mais eficientes e a instalação de painéis fotovoltaicos para autoconsumo. Estas melhorias foram avaliadas tanto do ponto de vista técnico como económico, considerando o retorno do investimento.

A melhoria do desempenho energético de edifícios existentes, como o caso de estudo aqui apresentado, não só contribui para a redução dos custos operacionais e das emissões de gases com efeito de estufa, como também melhora o conforto térmico dos ocupantes. Este estudo pretende, assim, servir como um exemplo real e de fundamentação para que as medidas de melhoria propostas sejam implementadas.

Palavras – Chave: Edifícios; Desempenho energético; Modelação de edifícios; Eficiência energética; Climatização.

ABSTRACT

As part of the Master's in Mechanical Engineering - Specialization in Project, Installation, and Maintenance of Thermal Systems, a master's project was undertaken. The primary objective of this project was to characterize and analyse the energy performance of the Mechanical and Electromechanical Engineering buildings at the *Instituto Superior de Engenharia de Coimbra*, as well as to propose and conduct a technical-economic assessment of measures aimed at increasing energy efficiency and integrating renewable energy sources.

The growing concern for sustainability and the need to reduce energy consumption in buildings, especially in existing structures with substantial improvement potential, make this type of study essential to promote more efficient and environmentally sustainable practices.

The study began with data collection on the buildings, including architectural plans, building envelope composition, major energy-consuming equipment, occupancy schedules, and equipment usage patterns. This data was used to create a detailed building model using CYPE dynamic building simulation *software*.

Based on the results obtained, particularly concerning thermal loads and useful energy requirements for HVAC, the main areas with potential for improvement were identified. Throughout the project, various enhancement solutions were proposed and analyzed, including lighting replacement, application of thermal insulation, installation of shading devices, glazing replacement, implementation of more efficient HVAC systems, and photovoltaic panels for self-consumption. These improvements were evaluated from both technical and economic perspectives, considering the return on investment.

Energy optimization in buildings such as these not only contributes to reducing operational costs and greenhouse gas emissions but also improves occupant thermal comfort. This study thus aims to serve as a real-world example and a foundation for implementing these recommended changes.

Keywords: Buildings; Energy performance; Building modeling; Energy efficiency; HVAC.

ÍNDICE

Agradecimentos	i
Resumo	ii
Abstract.....	iii
1 Introdução	1
1.1 Motivação.....	1
1.2 Objetivos do projeto.....	2
1.3 Estrutura do relatório	2
2 Enquadramento.....	4
2.1 Contexto energético atual	4
2.2 Sistema de Certificação Energética dos Edifícios	10
2.2.1 Enquadramento legal	10
2.2.2 Classificação energética dos edifícios.....	15
2.3 Conceitos teóricos de Transmissão de Calor.....	16
2.3.1 Mecanismos de Transmissão de Calor.....	16
3 Caracterização dos edifícios EM e EEM do ISEC.....	18
3.1 Instituto Superior de Engenharia de Coimbra	18
3.2 Localização e Orientação do Edifício EM e EEM	19
3.3 Descrição do edifício	21
3.4 Caracterização do Edifício	23
3.4.1 Laje térrea	23
3.4.2 Laje entre pisos	24
3.4.3 Laje plana acessível.....	26
3.4.4 Laje plana não acessível	27
3.4.5 Telhado	28
3.4.6 Parede exterior.....	28
3.4.7 Parede interior.....	30
3.4.8 Vãos envidraçados.....	31
3.4.9 Portas	31
3.5 Ocupação do edifício.....	31
3.6 Equipamentos Informáticos	32
3.7 Iluminação.....	33

3.8	Medições de Consumo	35
4	Criação do modelo 3D no <i>software</i> CYPE.....	40
4.1	Definição e caracterização do tipo de edifício.....	40
4.2	Importação das plantas do edifício	45
4.3	Definição dos sistemas de climatização.....	47
5	Cálculo das Necessidades Energéticas do Edifício.....	48
5.1	Necessidades de Energia Útil	48
5.2	Cargas térmicas de aquecimento e arrefecimento	49
6	Medidas de Melhoria e Análise de Resultados	51
6.1	Iluminação.....	52
6.1.1	Análise económica da melhoria proposta.....	53
6.2	Melhoria da envolvente opaca exterior	56
6.2.1	Análise económica da proposta de melhoria	59
6.3	Climatização passiva	60
6.3.1	Sombreamento.....	60
6.3.2	Vãos envidraçados.....	64
6.4	Climatização ativa.....	69
6.4.1	<i>Split</i> e <i>Multi-Split</i>	69
6.4.2	Sistema VRF.....	74
6.5	Sistema Fotovoltaico.....	76
6.6	Determinação da Classe Energética do Edifício	84
6.7	Cálculo das emissões de dióxido de carbono evitadas	89
7	Conclusão	90
	Referências Bibliográficas.....	92

Índice de Figuras

Figura 2.1 - Evolução da dependência energética de Portugal de 2002 a 2022 (DGEG, 2024).....	5
Figura 2.2- Dependência energética na União Europeia em 2022 (DGEG, 2024)...	5
Figura 2.3- Metas setoriais de redução de CO ₂ (PNEC2030).....	8
Figura 2.4- Metas do plano REPowerEU (REPowerEU, 2022).	8
Figura 2.5- Metas do pacote Objetivo 55 (Objetivo 55, 2022).....	9
Figura 2.6- Classificação energética dos edifícios (Manual SCE,2023).....	12
Figura 2.7- Legislação da certificação energética dos edifícios (Decreto-Lei n.º 101-D/2020).....	13
Figura 2.8- Exigências para edifícios de habitação nZEB (Portaria n.º 98/2019)...	13
Figura 2.9- Exigências para edifícios de comércio e serviços nZEB (Portaria n.º 42/2019).....	14
Figura 2.10 - Definição da classe energética (Manual SCE,2023).	15
Figura 2.11- Processos de transmissão de energia térmica (André Brito, 2017).....	16
Figura 3.1- Fotografia satélite ISEC.....	19
Figura 3.2- Zonas climáticas de inverno e verão no continente (NUTS) (Despacho (extrato) n.º 15793-F/2013).	19
Figura 3.3 - Orientação da fachada do edifício.	20
Figura 3.4- Piso 0 do edifício.	21
Figura 3.5- Piso 1 do edifício.	22
Figura 3.6- Piso 2 do edifício.	22
Figura 3.7- Esquema da laje térrea.	24
Figura 3.8- Esquema da laje entre pisos.	25
Figura 3.9 - Esquema laje plana acessível.	26
Figura 3.10- Esquema laje plana não acessível.....	27
Figura 3.11- Esquema Telhado.....	28
Figura 3.12- Esquema da parede exterior.....	29
Figura 3.13- Esquema parede interior.....	30
Figura 3.14 - Distribuição da ocupação do Edifício	32
Figura 3.15 - Distribuição das potências nos compartimentos.....	33
Figura 3.16 - Potência de iluminação por compartimento.	34
Figura 3.17 – Analisador de energia trifásico da marca <i>PeackTech</i>	35

Figura 3.18 – Diagrama de Carga do Edifício e do ISEC (9 a 16 de março 2023).	36
Figura 3.19- Diagrama de Carga do Edifício e do ISEC (22 a 29 de junho 2023) ..	37
Figura 3.20- Diagrama de Carga do Edifício e do ISEC (12 a 21 de dezembro 2023).	37
Figura 3.21- Distribuição horária dos períodos contratados (ERSE,2023).....	39
Figura 4.1- Seleção do país da localização do Edifício no <i>software</i> CYPE.	41
Figura 4.2- Seleção do “Tipo de Obra” no <i>software</i> CYPE.....	41
Figura 4.3- Seleção do “Tipo de Edifício” no <i>software</i> CYPE.	42
Figura 4.4- Seleção do “Tipo de Projeto” no <i>software</i> CYPE.	43
Figura 4.5- Seleção do distrito da localização do Edifício no <i>software</i> CYPE.....	44
Figura 4.6- Caracterização dos pisos no <i>software</i> CYPE.....	44
Figura 4.7- Importação e atribuição das plantas no <i>software</i> CYPE.....	45
Figura 4.8- Caracterização e definição dos elementos construtivos no <i>software</i> CYPE.	46
Figura 4.9- Representação 3D do Edifício modelado no <i>software</i> CYPE.....	46
Figura 4.10- Menu de definição de Sistemas de Climatização no <i>Software</i> CYPE. ..	47
Figura 4.11- Menu de cálculos do <i>Software</i> CYPE.	47
Figura 5.1 - Necessidades energéticas do Edifício (modelo Base e Referência).....	48
Figura 5.2- Cargas térmicas do modelo base do Edifício.	49
Figura 5.3- Listagem das cargas térmicas para arrefecimento do compartimento M0A2.	50
Figura 6.1- Numeração e identificação das medidas de melhoria aplicadas.....	52
Figura 6.2-Cargas de arrefecimento e aquecimento com a substituição da iluminação.	53
Figura 6.3- Listagem do número de horas de utilização da iluminação no Edifício.	54
Figura 6.4- Esquema da parede exterior com aplicação de isolamento.	57
Figura 6.5- Listagem das cargas térmicas do Edifício com aplicação de Isolamento e Iluminação.	58
Figura 6.6 - Necessidades energéticas do Edifício após Medidas 1 e 2.	59
Figura 6.7- Esquema de dimensionamento para palas de sombreamento (Williams College, n.d.).....	61
Figura 6.8 - Cargas Térmicas do Edifício após a aplicação de palas de sombreamento.	62

Figura 6.9- Efeito do sombreamento das palas solares no edifício.....	63
Figura 6.10- Necessidades energéticas do edifício após implementação das Medidas 3 e 4.	63
Figura 6.11- Cargas térmicas após a aplicação de vidros térmicos em todo o edifício.	65
Figura 6.12- Cargas térmicas após aplicação da Medida 6.....	66
Figura 6.13- Cargas térmicas com aplicação de vidros térmicos em todo o edifício.	67
Figura 6.14- Necessidades energéticas para as Melhorias 2, 5, 6 e 7.....	68
Figura 6.15 - Custo da implementação de melhorias.....	69
Figura 6.16- Cargas térmicas do Edifício com melhoria do isolamento e iluminação.	70
Figura 6.17- Dados técnicos do sistema <i>Split</i> (Mitsubishi,2024).....	70
Figura 6.18- Unidades Interiores do tipo <i>Split</i> selecionadas para climatização do Edifício.....	71
Figura 6.19- Sistema Split Mitsubishi (Mitsubishi, 2024).	72
Figura 6.20- Exemplo de disposição da instalação do tipo <i>split</i> e <i>multisplit</i> no Piso 0 do Edifício.....	72
Figura 6.21- Necessidades energéticas do edifício com aplicação do sistema <i>Split</i> . 73	
Figura 6.22- Unidade Exterior Mitsubishi VRF-T FDC1350KXZE2.	74
Figura 6.23- Dados técnicos do equipamento Mitsubishi VRF-T FDC1350KXZE2 (Catálogo Mitsubishi, 2024).....	75
Figura 6.24- Unidade interior Mitsubishi FDK90KXZE1.	75
Figura 6.25- Necessidades energéticas do Edifício para VRF e <i>Split</i>	75
Figura 6.26– Consumo de energia anual do ISEC.	77
Figura 6.27- Painel Fotovoltaico AIKO- A630-MAH72Mw (Catálogo AIKO,2023).	77
Figura 6.28- Dados técnicos dos painéis fotovoltaicos A630-MAH72Mw (Catálogo AIKO,2023).	78
Figura 6.29 - Valores obtidos para instalação do sistema fotovoltaico.....	78
Figura 6.30- Balanço energético do sistema fotovoltaico da Opção 1.	79
Figura 6.31 - Valores consumidos e injetados na RESP para a Opção 1.....	79
Figura 6.32- Balanço energético do sistema fotovoltaico da Opção 5.	80
Figura 6.33- Valores consumidos e injetados na RESP para a Opção 5.	80

Figura 6.34- Esquema de instalação fotovoltaica (Tiago Faísca,2019).	81
Figura 6.35- Inversor Trifásico STP5.0-3AV-40 (Catálogo SMA, 2024).	82
Figura 6.36- Características técnicas do inversor Trifásico STP5.0-3AV-40 (Catálogo SMA, 2024).....	82
Figura 6.37- Representação do telhado do Edifício.....	83
Figura 6.38 – Tipo de consumos energia (Manual SCE, 2023).	85
Figura 6.39 – Eficiências de referência (Manual SCE, 2023).	86
Figura 6.40 – Fatores de conversão de energia final para energia primária (Manual SCE, 2023).....	86
Figura 6.41- IEE para o Edifício referência.....	87
Figura 6.42- IEE do Edifício Base.	88
Figura 6.43– IEE para o Edifício com as medidas de melhoria aplicadas.	88
Figura 6.44-Quantidade de CO ₂ evitado.....	89

Índice de Tabelas

Tabela 3.1 - Propriedades termofísicas da laje térrea (CYPE).....	24
Tabela 3.2- Propriedades termofísicas da laje entre pisos.	25
Tabela 3.3- Propriedades termofísicas da laje plana acessível.....	26
Tabela 3.4- Propriedades termofísicas da laje plana não acessível.	27
Tabela 3.5- Propriedades termofísicas do telhado.....	28
Tabela 3.6- Propriedades termofísicas da parede exterior.....	29
Tabela 3.7- Propriedades termofísicas da parede interior.	30
Tabela 3.8- Custo de energia elétrica por período horário contratado (EDP, 2024).	38
Tabela 6.1- Propriedades termofísicas da parede exterior com aplicação de isolamento.	57

Simbologia

A	Área [m^2]
hc	Coefficiente de transferência de calor convectivo [$\text{W}/(\text{m}^2.\text{K})$]
ΔT	Diferença de temperatura entre o fluido e a superfície [K]
σ	Constante de <i>Stefan-Boltzmann</i>
ε	Emissividade da superfície
T_{sup}	Temperatura absoluta da superfície [K]
T_{viz}	Temperatura absoluta das superfícies vizinhas [K]
U	Coefficiente global de transmissão de calor [$\text{W}/\text{m}^2.\text{K}$]
$\dot{q}_{cond}$	Calor transferido por unidade de tempo através de condução [W]
λ	Condutividade térmica [$\text{W}/\text{m}.\text{K}$]
$\dot{q}_{conv}$	Transmissão de calor por convecção [$\text{W}/(\text{m}^2.\text{K})$]
$\dot{q}_{rad}$	Transmissão de calor por radiação [$\text{W}/(\text{m}^2.\text{K})$]

Abreviaturas e Siglas

3D	Tridimensional
AIE	Agência Internacional de Energia
BIM	<i>Building Information Modeling</i>
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CE	Certificado Energético
CFB	Consumo Final Bruto de energia
CO ₂	Dióxido de Carbono
CTSP	Cursos Técnicos Superiores Profissionais
DDC	Diagrama de Carga Elétrica
DEC	Departamento de Engenharia de Civil
DEIS	Departamento de Engenharia Informática e de Sistemas
DEE	Departamento de Engenharia Eletrotécnica
DEM	Departamento de Engenharia Mecânica
DEQB	Departamento de Engenharia Química e Biológica
DFM	Departamento de Física e Matemática
EE	Eficiência Energética sazonal em arrefecimento (SEER)
EM	Engenharia Mecânica
EPBD	<i>Energy Performance of Buildings Directive</i>
ERSE	Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos
EEM	Engenharia Eletromecânica
ETICS	Sistema de Isolamento Térmico pelo Exterior
FE	Fator de Emissão de Eletricidade
FER	Fontes de Energia Renováveis
FV	Fotovoltaico

GES	Grandes Edifícios de Serviço
GEE	Gases de Efeito de Estufa
H ₂	Hidrogénio
IEE _{Ref,s}	Indicador de Eficiência Energética de referência associado aos consumos anuais de energia do tipo 'S'
IEE _{RNE}	Indicador de Eficiência Energética renovável
IEEs	Indicador de Eficiência Energética relativo ao consumo do tipo 'S'
ISEC	Instituto Superior de Engenharia de Coimbra
IVA	Imposto Sobre Valor Acrescentado
LEDs	<i>Light Emitting Diodes</i>
MPPTs	<i>Maximum Power Point Tracking</i>
NE	Normas Europeias
NP	Normas Portuguesas
nZEB	<i>Near Zero-Emission Building</i>
NUTS	Nomenclatura das Unidades Territoriais para Fins Estatísticos
PDEE	Plano de Melhoria do Desempenho Energético dos Edifícios
PNEC	Plano Nacional Integrado de Energia e Clima
PQ	Perito Qualificado
PPEC	Plano de Promoção da Eficiência no Consumo de Energia
RESP	Rede Elétrica de Serviço Público
RIA	Relatórios de Implementação e Acompanhamento
RIEE	Rácio de Classe Energética
SCE	Sistema de Certificação Energética
SCOP	Coeficiente de desempenho sazonal em aquecimento
SEER	Eficiência Energética Sazonal em Arrefecimento
TGE	Técnico de Gestão de Energia
TIS	Técnico Inspeção de Sistemas Técnicos

TRM	Técnico de Instalação e Manutenção de Sistemas Técnicos
UE	União Europeia
VRF	<i>Variable Refrigerant Flow</i>
WC	<i>Water closet</i>

1 INTRODUÇÃO

1.1 Motivação

Nos últimos anos, as alterações climáticas têm vindo a destacar-se como um dos maiores desafios globais, com impactes significativos nas esferas social e ambiental. O aumento das emissões de gases com efeito de estufa (GEE) e consequente aquecimento global do planeta, assim como, as mudanças nos padrões climáticos exercem uma pressão direta sobre a forma como são projetados e utilizados os edifícios, uma vez que o setor da construção representa uma parte substancial do consumo de energia e das emissões de carbono a nível global, segundo o Relatório Especial sobre o Aquecimento Global de 1,5°C (IPCC, 2018) e o Relatório de Avaliação AR6 (IPCC, 2021), ambos do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas.

Na União Europeia (UE), os edifícios são responsáveis por aproximadamente 40% do consumo de energia final e por 36% das emissões de GEE e 75 % dos edifícios da União ainda são ineficientes do ponto de vista energético. Dois terços da energia consumida para o aquecimento e o arrefecimento de edifícios, a nível da UE, ainda provêm de combustíveis fósseis. Para descarbonizar o setor dos edifícios, é necessário abolir de forma progressiva a utilização de combustíveis fósseis no aquecimento e arrefecimento (EPBD, 2024). Estes dados sublinham a necessidade de adotar práticas mais sustentáveis no setor da construção e na operação de edifícios, sendo, segundo a UE, a eletrificação dos edifícios uma estratégia central que permite a integração de fontes renováveis e promove a eficiência energética.

Além disso, a guerra na Ucrânia evidenciou a vulnerabilidade energética da UE decorrente da sua dependência de combustíveis fósseis, reforçando a importância de acelerar a eletrificação como medida de resposta tanto à crise energética atual quanto como estratégia de longo prazo (AIE, 2022). Neste contexto, devem ser desenvolvidas soluções que contribuam para a melhoria da eficiência energética dos edifícios, reduzindo simultaneamente o consumo de energia e a emissão de GEE associadas.

Os Edifícios de Engenharia Mecânica (EM) e de Engenharia Eletromecânica (EEM), que se podem considerar um único edifício, em estudo neste projeto de mestrado, é um bom exemplo para se poder demonstrar como é possível conciliar conforto térmico e eficiência energética, num edifício existente. A melhoria do seu desempenho térmico e energético, utilizando estratégias passivas e ativas, não só contribui para a melhoria do conforto térmico dos ocupantes, como contribui para a diminuição do consumo de energia e das emissões de GEE.

Assim, a necessidade de reduzir a pegada ambiental dos edifícios e pelo compromisso de criar soluções mais sustentáveis e eficientes, que possam servir de modelo para a remodelação de edifícios existentes, motiva este trabalho.

1.2 Objetivos do projeto

O principal objetivo deste estudo é otimizar o desempenho energético do edifício (EM e EEM), implementando um conjunto de medidas que melhorem a sua eficiência energética. A intenção é reduzir o consumo de energia, aumentar o conforto térmico e minimizar a pegada ecológica associada à sua operação. Para alcançar este objetivo, será realizada uma análise detalhada dos parâmetros energéticos do edifício, seguida da análise de resultados obtidos com a implementação de soluções de melhoria da eficiência energética.

Ao longo do trabalho e de acordo com as diferentes fases, os objetivos específicos do estudo foram:

- Recolha de informação dos consumos energéticos e respetiva utilização dos espaços e equipamentos;
- Monitorização dos consumos de energia elétrica;
- Caracterização do edifício e sua modelação com o *software* CYPE;
- Determinação das cargas térmicas e das necessidades úteis para climatização;
- Análise dos resultados energéticos com aplicação de medidas de melhoria;
- Análise da viabilidade técnico-económica das medidas de melhoria;
- Seleção e recomendação das medidas a serem implementadas;
- Determinação da classe energética do edifício;
- Cálculo da redução das emissões de GEE.

1.3 Estrutura do relatório

Para além do capítulo de introdução, o relatório é composto por mais 6 capítulos, como se explica de seguida.

O Capítulo 2 apresenta o enquadramento do estudo, começando com uma descrição do contexto energético atual da EU e de Portugal. De seguida é descrito o enquadramento legal aplicável à certificação energética de edifícios e apresentados os critérios de classificação energética dos edifícios. Este capítulo inclui também uma secção de conceitos teóricos, na qual são descritos os mecanismos de transferência de calor.

No Capítulo 3, é efetuada a caracterização do edifício (EM e EEM) do Instituto Superior de Engenharia de Coimbra (ISEC), abordando a localização, orientação e descrição física das estruturas, bem como a caracterização dos elementos construtivos da envolvente e dos sistemas que afetam o desempenho energético do edifício.

O Capítulo 4 descreve a criação do modelo 3D do edifício (EM e EEM) no *software* CYPE, incluindo a definição do tipo de edifício, a importação das plantas e a definição dos sistemas de climatização.

No Capítulo 5, são calculadas as necessidades energéticas do edifício, detalhando as necessidades de energia útil e as cargas térmicas de aquecimento e arrefecimento, que constituem a base para, posteriormente, serem avaliados os resultados da implementação de medidas de melhoria.

O Capítulo 6 apresenta as medidas de melhoria estudadas e a análise dos seus resultados. Para cada medida, é realizada uma avaliação técnica e económica. Com base nos resultados são recomendadas soluções para a iluminação, para a envolvente opaca e para a climatização, bem como a instalação de um sistema fotovoltaico. É também determinada a classe energética do edifício sem e com a aplicação das medidas de melhoria. Por fim, são determinadas as emissões de CO₂ evitadas com a aplicação das medidas.

Por fim, o Capítulo 7 resume as conclusões do estudo, destacando os resultados obtidos e o impacto das medidas na eficiência energética do edifício.

2 ENQUADRAMENTO

2.1 Contexto energético atual

A dependência energética dos países e os problemas ambientais associados às alterações climáticas levam à necessidade emergente de utilização de energias alternativas, que não são necessariamente energias renováveis, mas a maioria tem origem renovável. Estas formas de energia não só aumentam sua resiliência a choques externos, tais como crises geopolíticas ou desastres naturais, mas também conseguem reduzir gradualmente os impactos ambientais negativos associados ao consumo de combustíveis fósseis. A diversificação, nesse sentido, não é apenas uma questão de suprimento energético, mas também uma questão estratégica para garantir um desenvolvimento sustentável, com menor impacto ecológico e maior estabilidade económica.

A gestão energética é então um dos maiores desafios do século XXI, com implicações na economia, na sociedade e no ambiente a nível global. A crescente necessidade de energia, impulsionada pelo aumento populacional e pelo desenvolvimento económico, coloca uma pressão sem precedentes sobre os recursos naturais e os sistemas de produção de energia. Adicionalmente, a dependência de fontes de energia fósseis tem agravado problemas como a degradação ambiental, as alterações climáticas e a poluição, criando a necessidade de transição para fontes de energia mais limpas e sustentáveis, chamadas energias verdes (IEA, 2023).

A situação energética de Portugal é caracterizada por uma elevada dependência da importação de recursos energéticos, algo que, no curto prazo, é inevitável. No entanto, para reduzir essa dependência no futuro, será necessário o desenvolvimento e a aplicação de tecnologias baseadas em fontes renováveis, além de uma utilização mais racional e eficiente da energia. Portugal está particularmente vulnerável a dois fatores externos: perturbações súbitas no abastecimento internacional de energia e flutuações abruptas dos preços no mercado internacional, assim é necessária uma estratégia de diversificação e fortalecimento das fontes de energia internas (DGEG, 2023).

A dependência energética tornou-se um problema no setor da Energia baseada em combustíveis fósseis. Portugal apresentou uma dependência energética de 71,2%, em 2022 (Figura 2.1) e na União Europeia (UE), Portugal foi o 12º país com a maior dependência energética (Figura 2.2). As energias renováveis representaram, em 2022, 34,7% do Consumo Final Bruto de energia (CFB), e Portugal posicionou-se como o 6º país da União Europeia com energia proveniente de fontes renováveis usadas no CFB (DGEG, 2024).

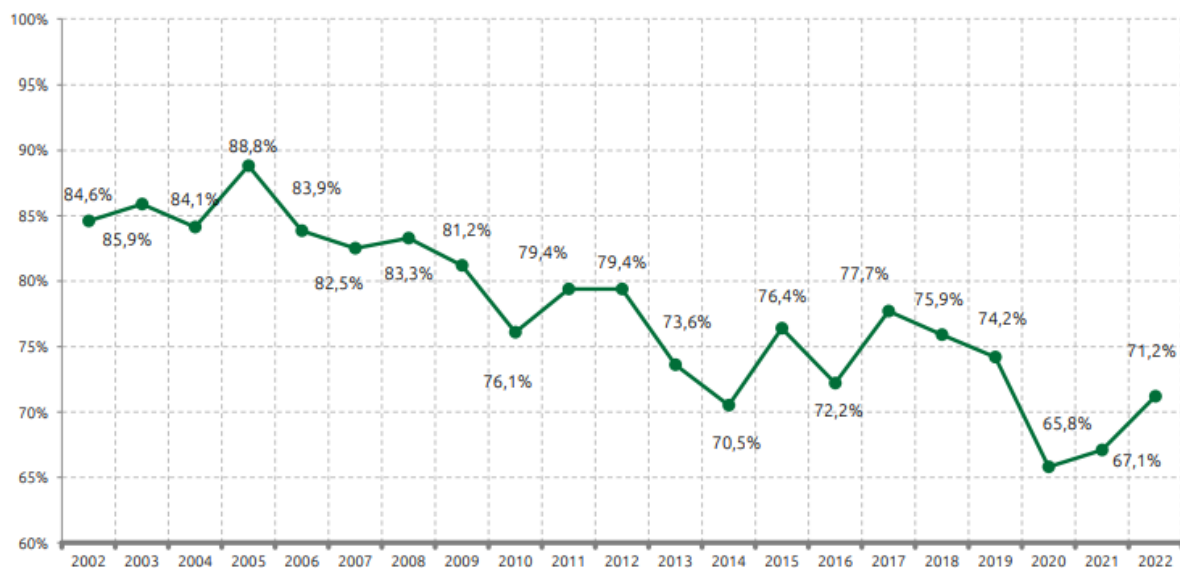


Figura 2.1 - Evolução da dependência energética de Portugal de 2002 a 2022 (DGEG, 2024).

A União Europeia é simultaneamente produtora e importadora de energia. Em 2022, cerca de 55% da energia consumida na UE foi importada. Mais de 40 % da energia produzida na UE proveio de fontes de energia renováveis, enquanto cerca de um terço foi produzida em centrais nucleares.

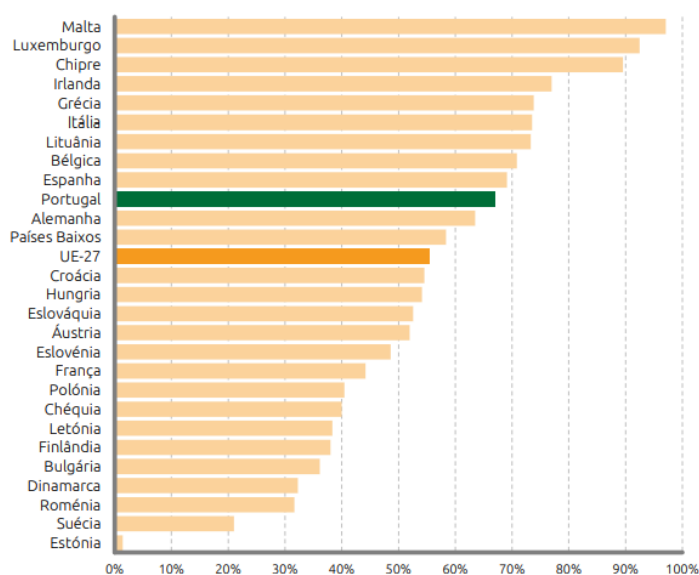


Figura 2.2- Dependência energética na União Europeia em 2022 (DGEG, 2024).

A crise energética está intrinsecamente ligada à crise económica, pois o fornecimento e os preços da energia afetam diretamente a economia de qualquer região. Na União Europeia, os combustíveis fósseis representam 77% do uso para aquecimento e arrefecimento, o que é significativo, considerando que cerca de 50% do consumo energético europeu é destinado a essas funções. Nos edifícios, estima-se que 79% da energia final seja usada apenas para aquecimento e água quente sanitária. No entanto,

a dependência da UE em relação ao gás importado agrava a situação, com 90% desse recurso vindo de fora, sendo que, em 2021, mais de 40% do gás natural era proveniente da Rússia. Além disso, 27% do petróleo e 46% do carvão também eram importados da Rússia. Esta dependência coloca em risco a segurança energética e, consequentemente, a estabilidade económica da região. A única solução duradoura é o Pacto Ecológico Europeu, que visa alavancar as energias renováveis e a eficiência energética o mais rápido possível, mitigando assim tanto a crise energética quanto a económica (Comissão Europeia, 2024).

De acordo com a Agência Internacional de Energia (AIE), a crise resultante obrigou a Europa a procurar alternativas rápidas, reforçando a importância de diversificar as fontes de energia e aumentar a eficiência energética para reduzir a dependência de fontes externas vulneráveis (AIE, 2022). Com a cooperação entre os Estados membros foi possível a redução do preço do gás nos finais de 2022, que se manteve relativamente estável em 2023, atingindo um valor de 34 euros por um Megawatt-hora (MWh), sendo quase nove vezes menor do que no pico da crise, quando o preço de um MWh ultrapassou os 300 euros. Já nas energias renováveis, no ano de 2022 assinalou-se um recorde para a energia solar, com 41 Gigawatts de capacidade fotovoltaica instalada, ou seja, mais 60 % do que em 2021 (26 GW). Em 2022, pela primeira vez, foi produzida mais eletricidade na UE a partir de energia eólica e solar do que a partir de combustíveis fósseis (Comissão Europeia, 2023).

A nível ambiental, um dos grandes problemas são as alterações climáticas, em particular o aquecimento global do planeta. Caso os sistemas energéticos continuem a depender predominantemente de combustíveis fósseis, a temperatura média global poderá aumentar entre 5 a 6°C até o final deste século. Esse aumento de temperatura pode ter consequências graves, como a elevação do nível dos oceanos, o que pode levar à submersão de muitas cidades costeiras. Além disso, haverá o crescimento e o surgimento de desertos, causando desequilíbrios em vários ecossistemas. Também é esperada a intensificação de fenómenos meteorológicos severos, como tempestades, inundações, vendavais, ondas de calor e secas prolongadas. O aumento da evaporação das águas dos oceanos poderá ainda resultar em mais furacões, tufões e ciclones, agravando os impactos climáticos e ambientais em várias partes do mundo (IPCC, 2021).

Com o intuito de fazer frente às alterações climáticas provocadas pelo aumento do efeito de estufa, países de todo o mundo têm investido esforços no desenvolvimento e utilização de recursos de energia renováveis e de técnicas de eficiência energética, de forma a reduzir o consumo de energia primária e as emissões de Gases de Efeito de Estufa (GEE), onde se inclui o CO₂. As emissões totais de GEE, no setor da energia, em 2022, representaram 67,2% das emissões totais mundiais.

Em Portugal, os transportes e a produção e transformação de energia são as fontes de emissão de GEE mais significativas, representando respetivamente 30,3% e 14,9% do total das emissões nacionais. A redução das emissões no setor da energia verificada desde 2017 em Portugal, resultou maioritariamente do fim da produção

de eletricidade a partir do carvão, da transição para o uso de gás natural e do crescimento do contributo das fontes renováveis para a produção de energia elétrica. Em 2022, a produção de energia de origem renovável situou-se em 6627 ktep (quilo toneladas equivalentes de petróleo), já a produção de eletricidade a partir de Fontes Energia Renováveis (FER), situou-se nos 29910 GWh. Esta incorporação permitiu que Portugal fosse o quarto Estado-Membro da UE com maior incorporação de FER na produção de eletricidade com origem na componente eólica (44,3%), na hídrica (29,6%), na biomassa (13,8%), na fotovoltaica (11,8%) e na geotérmica (0,7%).

O Plano Nacional Integrado de Energia e Clima (PNEC) é o principal instrumento de política energética e climática para a década 2021 a 2030 e visa o estabelecimento e cumprimento de metas e objetivos em matéria de emissões de gases com efeito de estufa, energias renováveis, eficiência energética, segurança energética, mercado interno e investigação, inovação e competitividade. O caminho para a neutralidade carbónica em 2050 e a concretização da transição energética requerem uma forte aposta nas energias renováveis, bem como na eficiência energética. A promoção de medidas que possam estimular o investimento, o emprego verde e a redução das importações de energia é outro dos aspetos a serem levados em conta neste processo. Para alcançar estas metas, é necessário que sejam desenvolvidas ferramentas que possam avaliar e medir a evolução do país em relação aos principais indicadores energéticos, tais como a “Energia em Números”, uma publicação de grande relevância.

Atualmente, a eficiência energética é um tema que se encontra no centro do debate e das decisões políticas. Isso é evidente nas várias iniciativas em vigor, como o Roteiro para a Neutralidade Carbónica 2050, o PNEC 2030 e a Estratégia de Longo Prazo para a Renovação do Edificado. Estes instrumentos demonstram que a eficiência energética é uma prioridade para alcançar a neutralidade carbónica. O Plano Nacional Energia e Clima 2021-2030 (PNEC 2030) estabelece um conjunto de metas ambiciosas em matéria de energia e clima para o horizonte 2021-2030, nomeadamente a redução das emissões de gases com efeito de estufa até 55% face a 2005, a redução do consumo de energia primária em 35% e o aumento do peso das energias renováveis no consumo final bruto de energia para 47%, entretanto aumentada para 49% (Figura 2.3). A eficiência energética continua a ser uma área prioritária no PNEC 2030, juntamente com o reforço da aposta nas energias renováveis, contribuindo para a redução da dependência energética do país para 65% em 2030 e para valores inferiores a 20% em 2050 (DGEG, 2023).

	2020	2030
Serviços	-65%	-70%
Residencial	-14%	-35%
Transportes	-14%	-40%
Agricultura	-8%	-11%
Resíduos e Águas residuais	-14%	-30%

Figura 2.3- Metas setoriais de redução de CO₂ (PNEC 2030, 2024).

No seguimento da guerra da Rússia com a Ucrânia, foi desenvolvido o plano REPowerEU, que visa reduzir a dependência dos combustíveis fósseis russos, reorientando rapidamente a transição para as energias limpas e unindo esforços a fim de alcançar um sistema energético mais resiliente e uma verdadeira União da Energia (Figura 2.4).

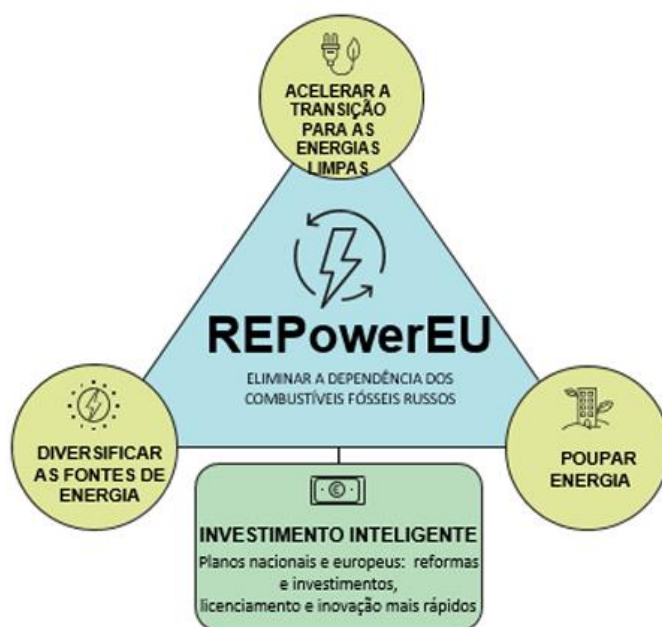


Figura 2.4- Metas do plano REPowerEU (REPowerEU, 2022).

Alguns pontos importantes para promover o uso de fontes de energia renovável são: aumentar a meta da Diretiva Energias Renováveis para 45 % até 2030, elevando assim a produção de energia a partir de fontes renováveis para 1236 GW até 2030; recurso à energia solar fotovoltaica, com o plano REPowerEU a meta é instalar mais 320 GW de energia solar fotovoltaica até 2025, e quase 600 GW até 2030; produzir energia solar nas coberturas de edifícios para categorias específicas de edifícios.

Também foi criado o pacote Objetivo 55 (Figura 2.5), que corresponde a um conjunto de propostas destinadas a rever e atualizar a legislação da UE para reduzir as emissões de gases de efeito de estufa em, pelo menos, 55% até 2030, estando definidas as seguintes áreas de atuação (Objetivo 55, 2022):

- Energias renováveis
- Eficiência energética
- Desempenho energético dos edifícios
- Reforma do Sistema de Comércio de Licenças de Emissão da UE
- Metas de redução das emissões dos setores não CELE
- Fundo social para o clima - apoiar as pessoas e as empresas mais afetadas
- Mecanismo de ajustamento carbónico fronteiriço (fora do seu território)
- Emissões e remoções de gases resultantes do uso do solo, da alteração do uso do solo e das florestas
- Normas de emissão de CO₂ para automóveis de passageiros e veículos comerciais ligeiros
- Redução das emissões de metano no setor da energia
- Combustíveis sustentáveis para a aviação
- Combustíveis mais ecológicos nos transportes marítimos
- Infraestrutura para combustíveis alternativos (Postos de abastecimento H₂ e Eletricidade)
- Pacote relativo ao mercado do hidrogénio e do gás descarbonizado
- Tributação da energia

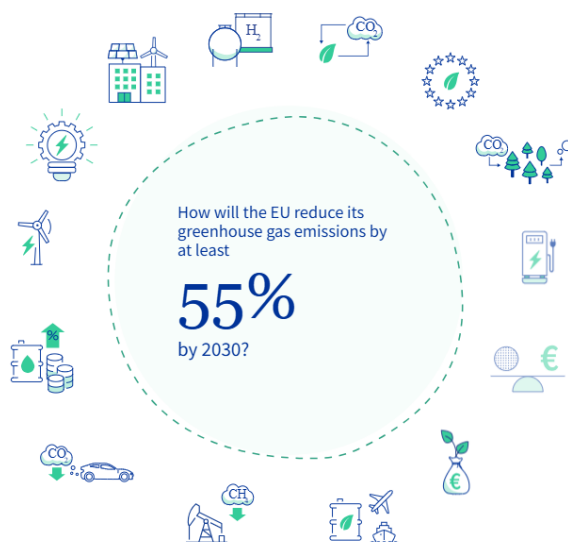


Figura 2.5- Metas do pacote Objetivo 55 (Objetivo 55, 2022).

Segundo o Objetivo 55 a poupança é a forma mais rápida e económica de fazer face à atual crise energética. O pacote Objetivo 55 reduziria o consumo de gás em 30 % até 2030 e mais de um terço dessa poupança decorreria do cumprimento da meta de eficiência energética da UE.

Para alcançar as metas do Objetivo 55, o desempenho energético dos edifícios é uma peça fundamental nas políticas de sustentabilidade e eficiência energética da EU, visto que o setor dos edifícios é responsável por 40% das necessidades energéticas, o que corresponde à maior fração de consumo de energia de entre os setores de atividade económica. Sendo responsáveis por 36% das emissões de dióxido de carbono (CO₂), a eficiência energética dos edifícios constitui por isso um elemento central da política da eficiência energética da União Europeia. Em Portugal face às menores necessidades de aquecimento dos edifícios, os consumos neste setor (doméstico e serviços) representam cerca de 30% da energia disponível para consumo final. (“Energia em Números 2024”, DGEG)

As poupanças e ganhos de eficiência energética adicionais nos edifícios, através da Diretiva Desempenho Energético dos Edifícios, com uma rápida execução permitiria o aumento das poupanças de energia, graças a uma maior eficiência energética e a uma utilização mais eficiente dos recursos para uma vasta gama de produtos. Para o efeito, os Estados-Membros devem aplicar medidas de apoio, tais como taxas reduzidas de IVA para sistemas de aquecimento de elevada eficiência e para o isolamento dos edifícios, bem como de outras medidas em termos de preços da energia, que incentivem a mudança para bombas de calor e a aquisição de aparelhos mais eficientes (Objetivo 55, 2022).

2.2 Sistema de Certificação Energética dos Edifícios

2.2.1 Enquadramento legal

A Diretiva Europeia sobre o Desempenho Energético dos Edifícios (EPBD) de 2018 foi transposta para a legislação portuguesa através do Decreto-Lei n.º 101-D/2020. Este Decreto-Lei regula o Sistema de Certificação Energética dos Edifícios (SCE), aplicando requisitos técnicos e energéticos a edifícios habitacionais, comerciais e de serviços, tanto novos quanto renovados. O objetivo é garantir que os edifícios cumpram normas mais rigorosas de eficiência energética, contribuindo para a sustentabilidade e redução do consumo de energia.

No âmbito da Certificação Energética dos Edifícios, a Diretiva (UE) 2018/844, de 30 de maio de 2018, introduziu mudanças importantes com o objetivo de promover a sustentabilidade energética nos edifícios. Entre as alterações estão o incentivo ao uso de sistemas energéticos renováveis e o desincentivo à utilização de combustíveis fósseis, a integração de soluções de mobilidade elétrica, a automatização e controle dos edifícios, a criação de um indicador de aptidão para tecnologias inteligentes, além da manutenção e inspeção periódica. Foram adicionados conceitos inovadores, como o custo/benefício considerando o ciclo de vida alargado dos edifícios e o alongamento do horizonte temporal dos investimentos para focar no retorno energético a longo prazo. Os requisitos mínimos de eficiência passaram a ser mais

exigentes e controlados a nível europeu, com a necessidade de justificar a viabilidade económica e a proximidade com o nível ótimo calculado. A Diretiva também introduziu o Plano de Melhoria do Desempenho Energético dos Edifícios, que estabelece uma classe energética mínima para edifícios existentes, e reforçou a metodologia para edifícios com necessidades quase nulas de energia (nZEB), exigindo que novos edifícios supram mais de 50% de suas necessidades energéticas com fontes renováveis.

O Sistema de Certificação Energética dos Edifícios (SCE), regulamentado pelo Decreto-Lei n.º 101-D/2020, de 7 de dezembro, estabelece os requisitos para a melhoria do desempenho energético de edifícios, garantindo a sua avaliação através da emissão de um Certificado Energético (CE). A avaliação energética dos edifícios inclui uma análise detalhada das condições de utilização de energia, caracterizando consumos, envolventes e sistemas técnicos, além de realizar simulações dinâmicas dos consumos energéticos. O Manual SCE, revisto periodicamente, define a metodologia para a avaliação do desempenho energético, conforme disposto no Decreto-Lei. A implementação do sistema envolve diferentes técnicos qualificados, como o Perito Qualificado (PQ), responsável por emitir certificados e identificar melhorias de eficiência; o Técnico de Instalação e Manutenção de Sistemas Técnicos (TRM), que supervisiona a instalação e atualização de sistemas; o Técnico de Gestão de Energia (TGE), encarregado da gestão de energia e manutenção; e o Técnico de Inspeção de Sistemas Técnicos (TIS), responsável pelas inspeções regulares aos sistemas técnicos dos edifícios. Estes profissionais asseguram que os edifícios cumprem os requisitos de eficiência energética, contribuindo para a sustentabilidade e redução do consumo de energia (Decreto-Lei n.º 101-D/2020).

A avaliação energética nos Grandes Edifícios de Serviços (GES) garante que se cumpram os requisitos de eficiência energética estabelecidos pelo Decreto-Lei n.º 101-D/2020, de 7 de dezembro. Os GES são obrigados a manter um nível mínimo de desempenho energético (Figura 2.6), e caso esse nível não seja atingido, devem submeter um Plano de Melhoria do Desempenho Energético dos Edifícios (PDEE) no Portal SCE. Este plano deve ser implementado num prazo razoável, conforme estabelecido pelo Despacho 6476-D/2021, de 1 de julho. Os GES com uma classe energética inferior a C ou que apresentem um consumo energético igual ou superior a 5,5 GWh no ano civil anterior (excetuando energias renováveis com emissões nulas) estão obrigados a apresentar o PDEE (Despacho n.º 6476-D/2021).



Figura 2.6- Classificação energética dos edifícios (Manual SCE,2023).

O PDEE deve incluir medidas que garantam a melhoria do desempenho energético dos edifícios, visando atingir uma classe energética igual ou superior a C, uma redução mínima de 4% no consumo de energia primária em relação ao ano base, e a manutenção ou redução das emissões de gases com efeito de estufa. As medidas propostas no PDEE devem ter um período de retorno simples igual ou inferior a oito anos e ser implementadas de forma obrigatória.

Além disso, os GES devem submeter Relatórios de Implementação e Acompanhamento (RIA), elaborados por um Perito Qualificado (PQ-II), com o objetivo de monitorar o progresso das medidas implementadas no PDEE. O primeiro relatório deve ser submetido em até 90 dias após o início da execução do plano, e o último relatório deve incluir um balanço global da implementação, atestando a classe energética final por meio da atualização ou renovação do certificado energético (Decreto-Lei n.º 101-D/2020).

Em suma, o Sistema de Certificação Energética dos Edifícios classifica os edifícios com base no seu consumo energético, atribuindo-lhes uma classe que varia de A+ (mais eficiente) a F (menos eficiente). Esta certificação é obrigatória para todos os edifícios novos e os que passam por grandes renovações, sendo também necessária em transações de venda ou arrendamento. O decreto estabelece valores mínimos de eficiência energética para esses edifícios, alinhados com o conceito de edifícios de necessidades quase nulas de energia (nZEB), onde grande parte do consumo é coberto por fontes renováveis. Para edifícios que passam por grandes renovações, são exigidas medidas que melhorem a eficiência energética, como a melhoria do isolamento térmico, climatização e uso de energia renovável. O objetivo final é promover a sustentabilidade, reduzindo o consumo energético e as emissões de carbono, contribuindo para a transição energética. A responsabilidade pela conformidade recai sobre os proprietários e projetistas, e a certificação energética é supervisionada pela ADENE, no âmbito do Sistema Nacional de Certificação Energética (SCE), assegurando que os edifícios cumpram os padrões estabelecidos (Figura 2.7) (Decreto-Lei n.º 101-D/2020).

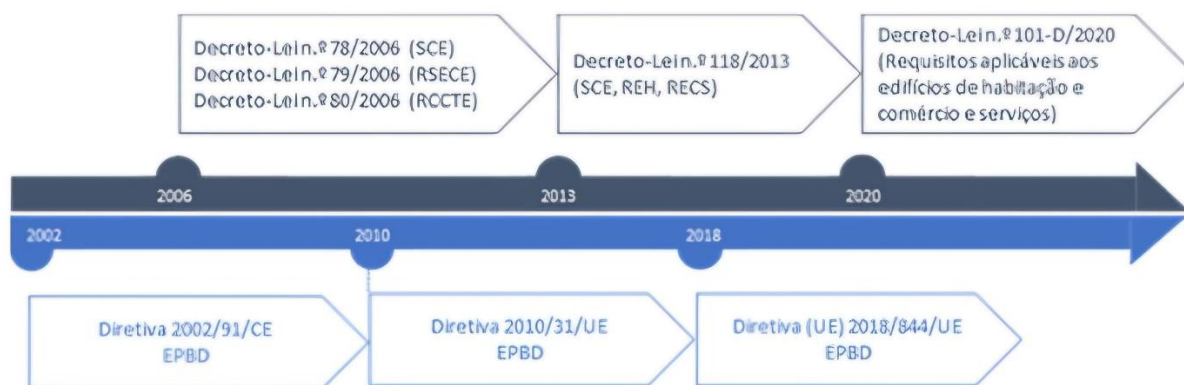


Figura 2.7- Legislação da certificação energética dos edifícios (Decreto-Lei n.º 101-D/2020).

As metas impostas para a renovação anual de edifícios, tanto em geral quanto no setor público, são definidas no contexto da Diretiva Europeia sobre o Desempenho Energético dos Edifícios (EPBD) e foram transpostas para a legislação portuguesa através do Decreto-Lei n.º 101-D/2020, de 7 de dezembro. Essas metas integram as políticas de eficiência energética e de combate às alterações climáticas, com o objetivo de melhorar o desempenho energético dos edifícios existentes, promovendo a sustentabilidade no setor da construção.

Para a renovação de edifícios em geral, a União Europeia e os Estados-Membros visam aumentar a taxa de renovação energética para, pelo menos, 3% ao ano, garantindo que o parque edificado se torne mais eficiente e sustentável. Adicionalmente, as renovações devem procurar aproximar os edifícios dos padrões de nZEB (*Nearly Zero Energy Buildings*), assegurando que grande parte das suas necessidades energéticas seja suprida por fontes renováveis (Figura 2.8 Figura 2.9) (União Europeia, 2018).

Energia útil para aquecimento: N_{IC} e N_I = indicadores de energia útil para aquecimento, calculado e nominal respetivamente	$N_{IC}/N_I \leq 75\%$
Energia primária: N_{TC} e N_T = indicadores de energia primária calculado e nominal respetivamente	$N_{TC}/N_T \leq 50\%$
Fontes de energia renovável devem suprir usos de climatização e AQS	$\geq 50\%$

Figura 2.8- Exigências para edifícios de habitação nZEB (Portaria n.º 98/2019).

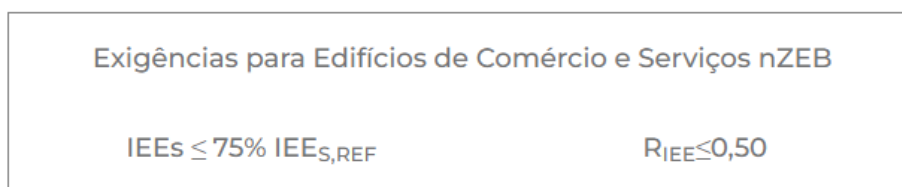


Figura 2.9- Exigências para edifícios de comércio e serviços nZEB (Portaria nº42/2019).

No que diz respeito aos edifícios do Estado, existe uma meta específica que determina a renovação anual de 3% da área útil total destes edifícios, com foco na melhoria da eficiência energética. Esse esforço visa garantir que os edifícios públicos alcancem altos padrões de desempenho energético, alinhados com os objetivos de descarbonização e eficiência estabelecidos a nível nacional e europeu. A renovação dos edifícios do setor público ajuda a atingir as metas climáticas, pois permite reduzir o consumo de energia, aumentar a utilização de fontes renováveis e diminuir as emissões de gases de efeito estufa. Esse compromisso reflete um esforço contínuo para garantir que os edifícios públicos sejam um exemplo no processo de transição energética e de cumprimento dos compromissos de sustentabilidade estabelecidos pela União Europeia.

Esta situação implica a necessidade de otimizar o consumo energético em todos os setores, incluindo a indústria, o comércio, a habitação e a educação. O setor industrial e o setor educacional, nomeadamente nas áreas de ciência e engenharia, têm um impacto significativo neste contexto. Estes setores não só são grandes consumidores de energia, mas também atuam como polos de inovação, capazes de desenvolver e implementar soluções avançadas para a otimização energética.

Neste contexto, a investigação na área da otimização energética em instituições de ensino e unidades de pesquisa, como os departamentos de engenharia, tem elevada importância. Este tipo de investigação não só possibilita a identificação de oportunidades para a melhoria da eficiência energética, mas também promove a formação de profissionais capacitados para enfrentar os desafios energéticos do futuro. A análise de estratégias de otimização energética nestes ambientes oferece uma contribuição significativa para a criação de modelos sustentáveis que podem ser aplicados em diferentes contextos e escalas.

A aplicação dos requisitos legais é sustentada por normas técnicas e regulamentação complementar, como a Portaria n.º 138-G/2021, de 1 de julho, que define os requisitos técnicos dos edifícios para efeitos do SCE, incluindo metodologias de cálculo e fatores de conversão de energia. Adicionalmente, as Normas Portuguesas (NP) e as Normas Europeias (EN) estabelecem métodos de cálculo e critérios técnicos para a avaliação do desempenho energético, tais como a NP 1037 (isolamento térmico em edifícios) e a série NP EN ISO 52000 (desempenho energético dos edifícios) (Portaria n.º 138-G/2021; NP EN ISO 52000).

De referir que já foi aprovada a nova diretiva EPBD de 2024, que deverá ser transposta a nível nacional o que implicará uma atualização ou reformulação da legislação nacional em vigor.

2.2.2 Classificação energética dos edifícios

A classificação energética dos edifícios é uma ferramenta que avalia o desempenho energético de uma construção, refletindo o seu consumo de energia para aquecimento, arrefecimento, ventilação e outros sistemas associados ao conforto. Este indicador fundamenta a sustentabilidade e eficiência de um edifício, impactando diretamente os custos operacionais e a pegada ecológica (ADENE, 2021).

A classificação energética deste edifício será determinada segundo as normas do Decreto-Lei n.º 101-D/2020, visando identificar oportunidades de melhoria no desempenho energético e reduzir o consumo de energia. O processo envolve uma auditoria detalhada por técnicos qualificados, que avaliam o estado atual dos sistemas energéticos e recomendam intervenções para otimização.

Nos edifícios de comércio e serviço, a classe energética é definida pelo rácio de classe energética (R_{IEE}) apresentado na equação 1:

$$R_{IEE} = \frac{IEE_S - IEE_{REN}}{IEE_{ref,s}} \quad (1)$$

Em que:

IEE_S – Indicador de Eficiência Energética relativo ao consumo do tipo “S”

$IEE_{Ref,s}$ – Indicador de Eficiência Energética de referência associado aos consumos anuais de energia do tipo “S”.

IEE_{REN} – Indicador de Eficiência Energética renovável associado à produção de energia elétrica e térmica a partir de fontes de energias renováveis.

O rácio R_{IEE} deve ser arredondado a duas casas decimais, sendo a classe energética a atribuir corresponde à condição verificada na escala apresentada na Figura 2.10 seguinte:

Classe Energética	Valor do R_{IEE}
A+	$R_{IEE} \leq 0,25$
A	$0,26 \leq R_{IEE} \leq 0,50$
B	$0,51 \leq R_{IEE} \leq 0,75$
B-	$0,76 \leq R_{IEE} \leq 1,00$
C	$1,01 \leq R_{IEE} \leq 1,50$
D	$1,51 \leq R_{IEE} \leq 2,00$
E	$2,01 \leq R_{IEE} \leq 2,50$
F	$R_{IEE} \geq 2,51$



Figura 2.10 - Definição da classe energética (Manual SCE,2023).

Este estudo pretende não só melhorar a classificação energética do edifício, mas também contribuir para o cumprimento das metas nacionais e europeias de redução de emissões de carbono e promoção da eficiência energética.

2.3 Conceitos teóricos de Transmissão de Calor

Neste capítulo serão abordados alguns conceitos teóricos necessários para uma melhor compreensão do estudo. Serão apresentados os processos de transferência de calor por condução, convecção e radiação, bem como o balanço térmico dos edifícios. Também serão discutidos os conceitos de ganhos solares e ganhos internos.

2.3.1 Mecanismos de Transmissão de Calor

Compreender os princípios físicos de transferência de energia sob a forma de calor é fundamental para compreender o balanço energético de um edifício. Existem três mecanismos físicos: transferência por condução, transferência por convecção e transferência por radiação (Figura 2.11).

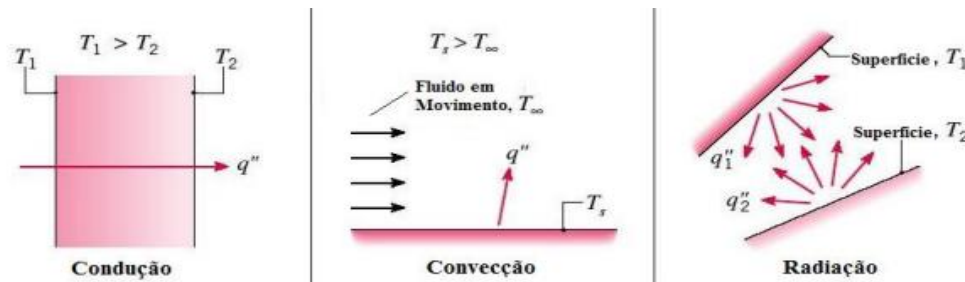


Figura 2.11- Processos de transmissão de energia térmica (André Brito, 2017).

A condução é o processo de transferência de calor, a uma escala molecular, isto é, as partículas mais energéticas transferem parte da sua energia vibracional para outras partículas menos energéticas de uma dada substância devido às interações que ocorrem entre elas (André Brito, 2017).

O calor transferido por unidade de tempo através de condução ($\dot{q}_{cond}$, [W]) é dado pela equação 2:

$$\dot{q}_{cond} = -\lambda \cdot A \cdot (\Delta T / \Delta x) \quad (2)$$

Esta expressão é também conhecida como Lei de Fourier e indica que a taxa de calor é proporcional à propriedade física do material designada por condutividade térmica (λ , [W/(m.K)]), que varia consoante o material em questão, a área de transferência perpendicular ao fluxo de calor (A , [m^2]), o Δx que é Espessura ou distância ao longo da qual ocorre a condução (m) e, ΔT é a diferença de temperatura. O sinal negativo na equação resulta do facto do calor ser transferido na direção de temperatura decrescente. (Brito, 2017)

A transmissão de calor por Convecção ocorre quando um fluido em movimento entra em contacto com uma superfície a uma temperatura diferente. A transmissão de calor por convecção pode ser classificada de acordo com a natureza do escoamento do fluido. Se o escoamento for desencadeado por meios externos denomina-se convecção forçada; caso contrário, estaremos perante uma convecção natural, em que o escoamento do fluido é induzido por forças originadas por diferenças de densidade. (André Brito, 2017)

A transferência de calor por convecção ($\dot{q}_{conv}$, [W]) é expressa pela equação 3:

$$\dot{q}_{conv} = hc.A.\Delta T \quad (3)$$

Onde:

- hc – Coeficiente de transferência de calor convectivo, [W/ ($m^2 \cdot K$)];
- A – Área perpendicular ao fluxo de calor, [m^2];
- ΔT – Diferença de temperatura entre o fluido e a superfície [K].

A Radiação Térmica é a energia emitida pela matéria resultante de alterações eletrónicas de átomos e moléculas. Esta energia radiante é constituída por ondas eletromagnéticas ou fótons e é emitida por qualquer corpo com uma temperatura superior a 0 kelvin. (André Brito, 2017)

A taxa de transmissão de calor por radiação térmica que um corpo ($\dot{q}_{rad}$, [W]) emite por unidade de tempo é dada pela Lei de *Stefan-Boltzmann* aplicada a um corpo real, representada pela Equação 4:

$$\dot{q}_{rad} = \sigma.\varepsilon.A.T_{sup}^4 \quad (4)$$

No entanto, uma vez que todas as superfícies emitem radiação térmica, o mais importante é conhecer o balanço da troca de calor por radiação entre superfícies, dado pela equação 5:

$$\dot{q}_{rad} = \sigma.\varepsilon.A.(T_{sup}^4 - T_{viz}^4) \quad (5)$$

Onde:

- σ – Constante de *Stefan-Boltzmann*, $5,67 \times 10^{-8}$ [W/ ($m^2 \cdot K^4$)];
- ε – Emissividade da superfície, ($0 < \varepsilon \leq 1$);
- T_{sup} – Temperatura absoluta da superfície, [K];
- T_{viz} – Temperatura absoluta das superfícies vizinhas [K].

Este mecanismo tem uma maior relevância quanto maior forem as temperaturas, uma vez que o calor emitido por radiação é proporcional à quarta potência da temperatura. (Brito, 2017).

3 CARACTERIZAÇÃO DOS EDIFÍCIOS EM E EEM DO ISEC

O caso de estudo, desenvolvido no âmbito da UC de projeto de mestrado, é relativo a dois edifícios, o edifício de Engenharia Mecânica (EM) do Departamento de Engenharia Mecânica e o Edifício de Eletromecânica (EEM) dos Departamentos de Engenharia Eletrotécnica e de Engenharia Mecânica do Instituto Superior de Engenharia de Coimbra (ISEC). Estes dois edifícios vão ser considerados como sendo um único edifício, visto que são anexos um ao outro e têm passagem direta interior entre eles em dois dos pisos, e para simplificar serão designados unicamente de Edifício.

Este capítulo tem por objetivo fazer uma descrição e caracterização do edifício em estudo e como se trata de um edifício integrante do ISEC é feita no início uma apresentação do ISEC.

3.1 Instituto Superior de Engenharia de Coimbra

O Instituto Superior de Engenharia de Coimbra (ISEC) tem uma história que remonta à sua fundação em 1965 como Instituto Industrial de Coimbra, uma escola técnica vocacional. Em 1974, após a aprovação do Decreto-Lei nº 830/74, a instituição foi reformulada, tornando-se o que hoje é o ISEC, uma escola de engenharia de ensino superior. Desde 1988, está integrado no Instituto Politécnico de Coimbra e tem como oferta formativa cursos técnicos superiores profissionais (CTSP), licenciaturas e mestrados.

Atualmente, o ISEC oferece 9 CTSP, 12 licenciaturas e 9 mestrados, nas áreas de engenharia civil, informática, biomédica, eletrotécnica, mecânica, entre outras.

No que toca à comunidade estudantil, o ISEC tem cerca de 3357 alunos, dos quais 2122 estão matriculados em licenciaturas e 400 em mestrados. Um dos principais pontos fortes do instituto é a elevada empregabilidade dos seus diplomados: 98% conseguem colocação profissional até seis meses após a conclusão do curso, refletindo a relevância dos cursos para o mercado de trabalho (ISEC, 2024).

O campus do ISEC é constituído por um conjunto de departamentos DEIS, DEC, DFM, DEQB, DEE e DEM, cada departamento tem um edifício associado. No caso do DEE e do DEM para além do edifício do departamento associado têm o edifício de Eletromecânica que é partilhado por ambos (Figura 3.1).

Existem ainda o edifício dos serviços centrais, o edifício do auditório e um edifício de laboratórios de Engenharia Mecânica designado de Oficinas.

O caso de estudo apresentado neste relatório tem como objetivo principal aumentar a eficiência energética do edifício EM e EEM que se localiza no ponto assinalado no mapa da instituição apresentado na Figura 3.1.

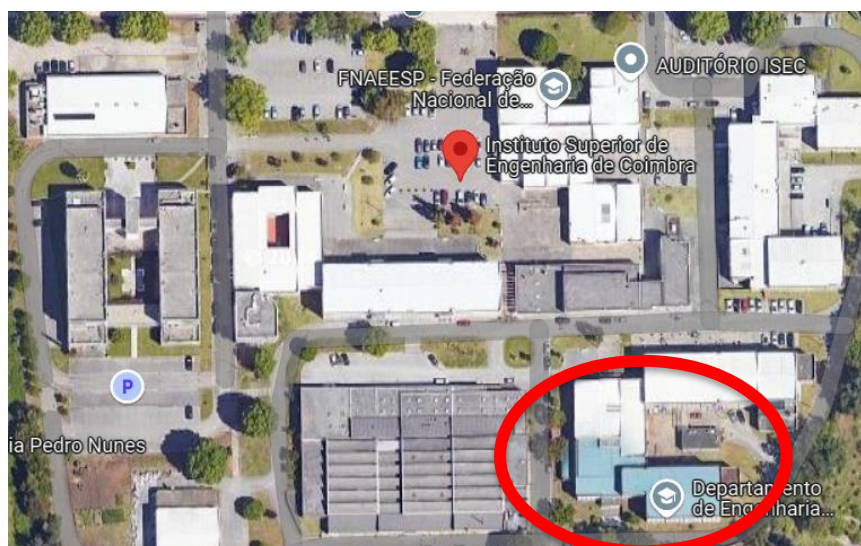


Figura 3.1- Fotografia satélite ISEC.

3.2 Localização e Orientação do Edifício EM e EEM

A localização e a orientação de um edifício têm uma influência significativa nas necessidades térmicas do edifício para manter as condições de conforto no seu interior. No projeto de construção de um edifício, é fundamental considerar a zona climática onde este está inserido para o correto dimensionamento dos sistemas de climatização.

Em termos de zonas climáticas, para efeitos de regulamentação térmica dos edifícios em Portugal (DL 101D/2020), as zonas são definidas com base nas NUTS e nos municípios e permitem estabelecer os requisitos de desempenho energético dos edifícios. As zonas climáticas de Portugal Continental podem ser observadas na Figura 3.2.

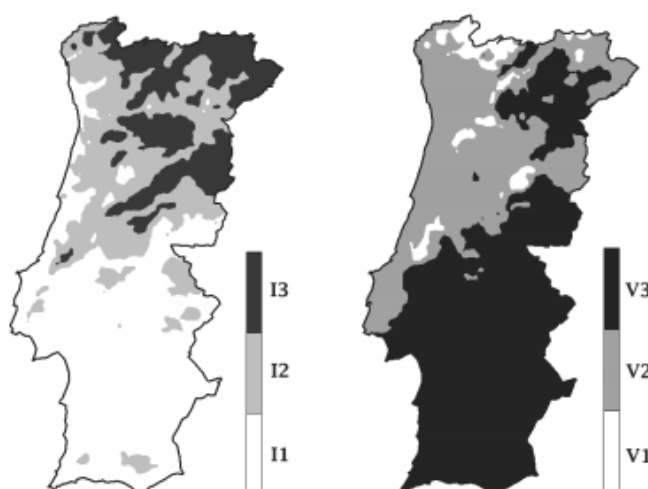


Figura 3.2- Zonas climáticas de inverno e verão no continente (NUTS) (Despacho (extrato) n.º 15793-F/2013).

O Instituto Superior de Engenharia de Coimbra (ISEC), onde está inserido o edifício em estudo, está localizado na cidade de Coimbra, a cerca de 60 metros de altitude, e pertence à Região Centro na classificação NUTS II (Nomenclatura das Unidades Territoriais para Fins Estatísticos) em Portugal.

Coimbra encontra-se inserida na Zona Climática I2 para o Inverno e V2 para o Verão.

- Zona Climática de Inverno (I2): Indica uma região com necessidades térmicas de aquecimento moderadas durante o inverno.
- Zona Climática de Verão (V2): Reflete necessidades térmicas de arrefecimento também moderadas durante o verão.

Quanto à orientação de um edifício, num clima como o de Portugal, idealmente, a maior fachada do edifício deve estar orientada a Sul, de forma a otimizar os ganhos solares ao longo de todo o ano. No Inverno a altura do sol é menor logo uma superfície vertical virada a sul, recebe os raios solares durante mais tempo do que uma superfície com outra orientação. No Verão o tempo de insolação de uma superfície vertical orientada a sul é menor do que no Inverno, visto que o sol está mais alto. Desta forma, os espaços de maior permanência num edifício bem como os vãos envidraçados, deverão estar orientados a Sul de modo a receberem maior radiação solar no Inverno e menor radiação no Verão (Cunha, M., 2017).

No Edifício, todas as fachadas têm uma grande área de vãos envidraçados, mas os compartimentos com maior ocupação, a maioria das salas de aulas, estão orientados para o Sudeste e Sudoeste, como apresentado na Figura 3.3, o que requer uma maior atenção sobre os ganhos solares.

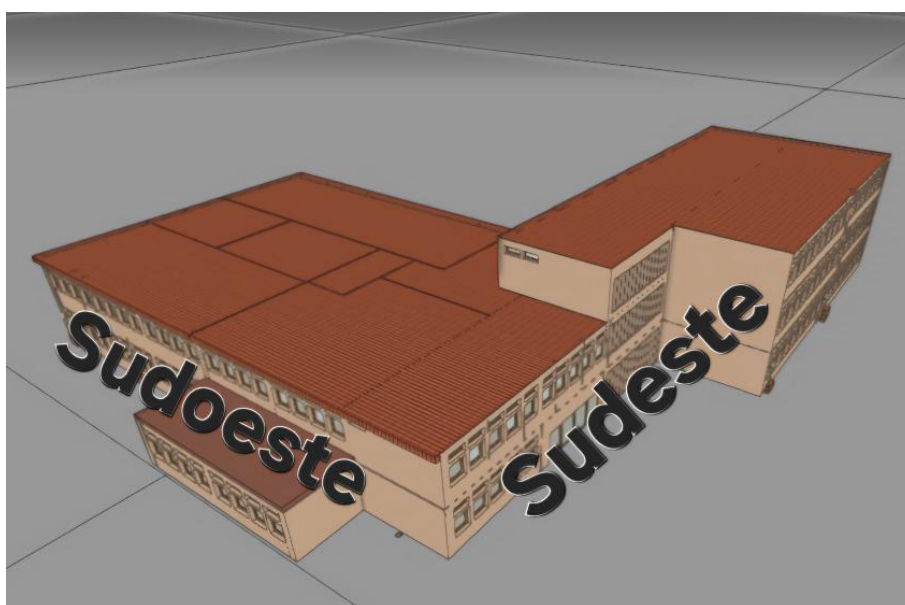


Figura 3.3 - Orientação da fachada do edifício.

3.3 Descrição do edifício

O edifício é constituído por três pisos distintos: piso 0, piso 1 e piso 2, com uma área útil total de 1757 m², projetados para acomodar diversas funções.

No piso 0, encontram-se áreas destinadas a diferentes usos, tais como 3 anfiteatros, 3 salas de aula para ensino regular e 2 salas de estudo. Adicionalmente, há 1 sala de apresentação e defesa de teses, um gabinete presidencial para a gestão administrativa, 2 instalações sanitárias (WC), e 2 áreas de arrumos para armazenamento. Além disso, este piso abriga zonas técnicas essenciais ao funcionamento do edifício, incluindo a zona de contadores e o posto de transformação, conforme representado na Figura 3.4.

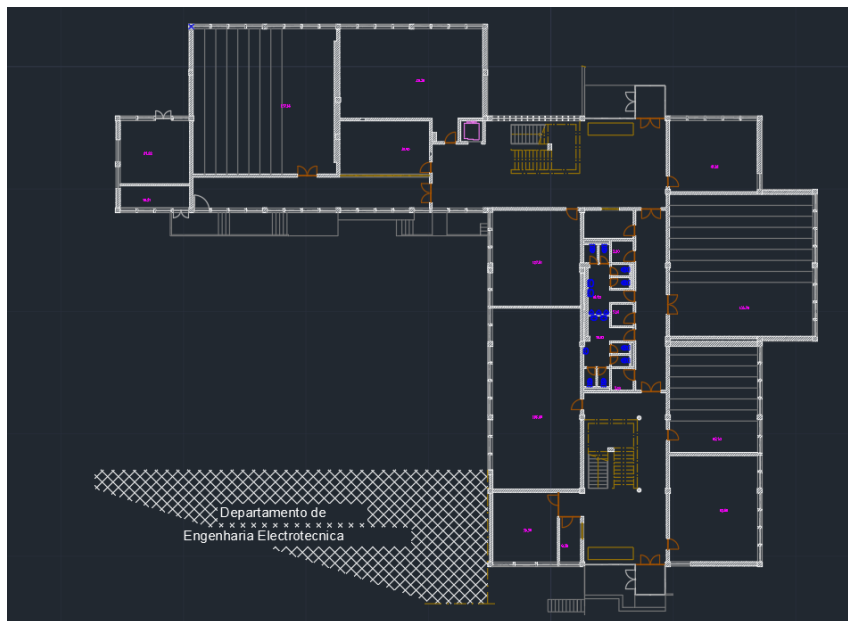


Figura 3.4- Piso 0 do edifício.

O piso 1 do edifício é composto por diversas áreas destinadas ao ensino e atividades administrativas. Este piso contém 3 salas de aula e 2 salas de computadores, equipadas para aulas práticas. Além disso, inclui 1 sala de reuniões, destinada a encontros e discussões institucionais, e 1 sala de professores. O piso conta também com 3 instalações sanitárias (WC) e 13 gabinetes, que são utilizados por docentes. A disposição e organização destes compartimentos estão representadas na Figura 3.5.



Figura 3.5- Piso 1 do edifício.

O Piso 2 é constituído por 3 laboratórios para atividades práticas, 1 sala de aula convencional e 2 WC, sendo o piso mais pequeno do departamento. A disposição dos compartimentos está definida de acordo com a Figura 3.6.

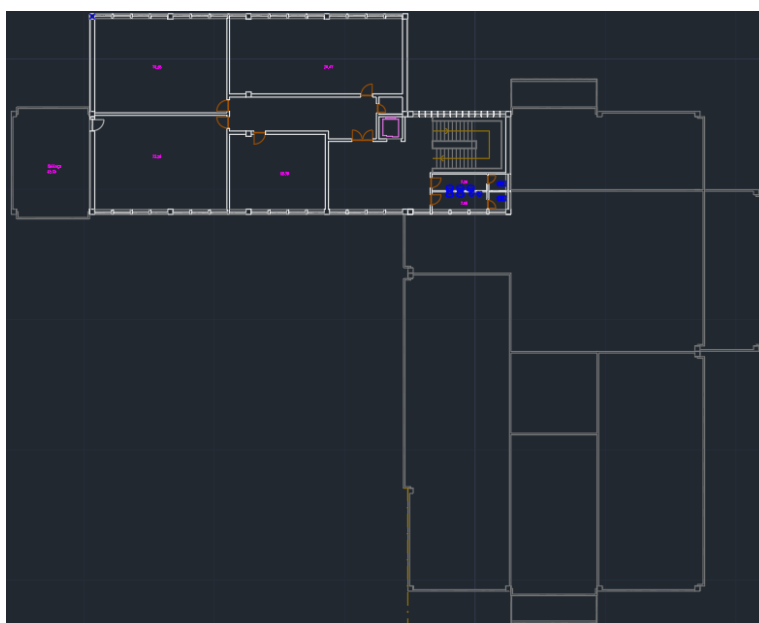


Figura 3.6- Piso 2 do edifício.

3.4 Caracterização do Edifício

O edifício do Departamento de Engenharia Mecânica (DEM) do Instituto Superior de Engenharia de Coimbra (ISEC) segue os princípios típicos da construção para edifícios de ensino.

A envolvente do edifício constitui a fronteira física entre os ocupantes e as condições climáticas exteriores, sendo um dos elementos influenciadores, por excelência, do conforto térmico e do desempenho energético do edifício. Fronteira esta constituída por paredes, janelas, portas, coberturas e pavimentos. Alguns aspetos relacionados com a forma como o edifício foi construído têm natural influência nos consumos de energia e no conforto dos seus ocupantes. (ADENE, 2024)

Os dados apresentados sobre cada um dos elementos da envolvente tiveram como base a informação solicitada ao gabinete técnico de manutenção de infraestruturas (GTMI) do ISEC.

3.4.1 Laje térrea

A laje térrea é um elemento construtivo utilizado em contacto direto com o solo, desempenhando um papel fundamental no isolamento térmico e no suporte estrutural do edifício. Esta laje é projetada para minimizar as perdas de calor através do solo, sendo frequentemente composta por camadas de materiais isolantes e impermeabilizantes, que ajudam a reduzir a troca de calor entre o interior do edifício e o terreno. Além disso, a correta conceção da laje térrea é crucial para garantir o conforto térmico e a eficiência energética da construção, particularmente em climas com variações térmicas significativas.

Este elemento é constituído por 4 camadas de acordo com a Figura 3.7. A camada 1 com 60 cm de betão armado, a camada 2, de impermeabilização, com 0,02 cm de filme de polietileno. A camada 3 é constituída por 4 cm de poliestireno extrudido, sendo a camada de isolamento térmico. A camada 4 é constituída por 10cm de betão de limpeza. A sua espessura total é 74 cm, com um comportamento térmico de arrefecimento (U) de 0,60 ($W/m^2.K$) (Tabela 3.1). O cálculo do coeficiente de transmissão térmica no *software* CYPE inclui as resistências térmicas superficiais convectivas internas e externas, de acordo com os parâmetros normativos, assegurando a consideração adequada das trocas térmicas por convecção e radiação nas interfaces da parede.

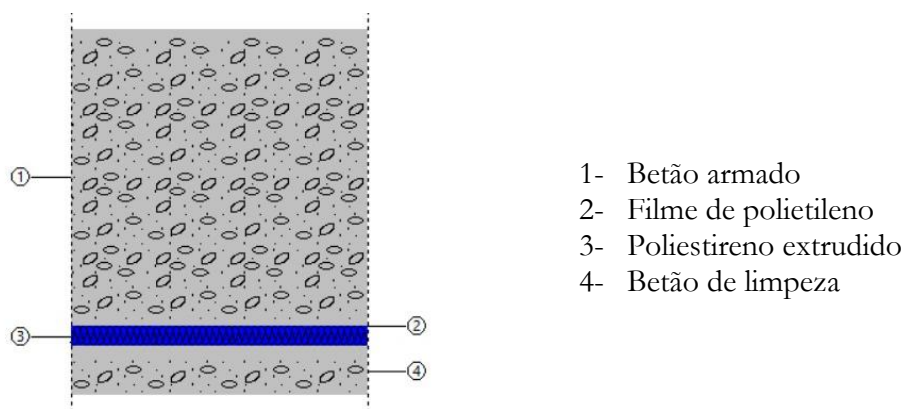


Figura 3.7- Esquema da laje térrea.

Tabela 3.1 - Propriedades termofísicas da laje térrea (CYPE).

Material	Espessura [cm]	Condutividade Térmica [W/m.K]	Resistência Térmica [m²K/W]	Massa volúmica [kg/m³]	Calor específico [J/kg.K]
Betão armado	60	2,500	0,24	2500	1000
Filme de polietileno	0,02	0,33	0,0006	920	1900
Poliestireno extrudido (XPS)	4	0,034	1,18	35	1450
Betão de Limpeza	10	2,500	0,04	2000	840

Coefficiente de transmissão térmica de arrefecimento: $U=0,60 \text{ W/m}^2\text{.K}$

3.4.2 Laje entre pisos

A laje entre pisos (Figura 3.8)(Tabela 3.2), segue o padrão clássico de uma laje aligeirada simples, com abobadilha de betão, com espessura de 33 cm e uma camada de mosaico de piso, com 1cm, totalizando 34 cm de espessura. O seu comportamento térmico superior de arrefecimento é de $1,73 \text{ (W/m}^2\text{.C)}$ e o de aquecimento é de $2,28 \text{ (W/m}^2\text{.C)}$. O seu comportamento térmico inferior para o arrefecimento é de $2,28 \text{ (W/m}^2\text{.C)}$ e para aquecimento é de $1,73 \text{ (W/m}^2\text{.C)}$. Estes valores são considerados altos, o que se justifica pela falta de isolamento aplicado na idealização da laje.

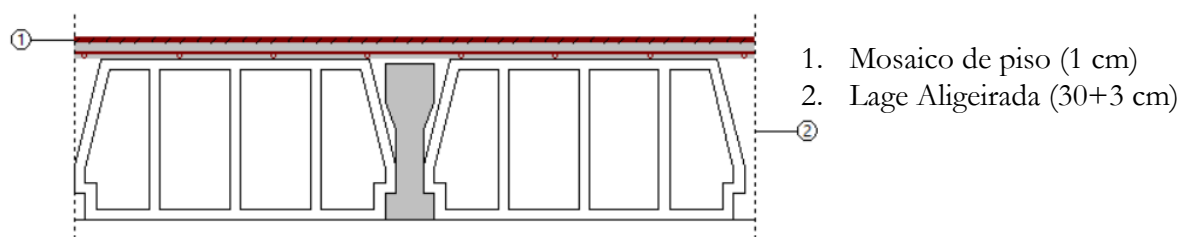


Figura 3.8- Esquema da laje entre pisos.

Tabela 3.2- Propriedades termofísicas da laje entre pisos.

Material	Espessura [cm]	Condutividade Térmica [W/m.K]	Resistência Térmica [m²K/W]	Massa volúmica [kg/m³]	Calor específico [J/kg.K]
Mosaico de piso	1	1,50	0,0067	2300	850
Laje aligeirada	33	-	-	-	-

Comportamento térmico (superior):

Coefficiente de transmissão térmica de arrefecimento: $U=1,73 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ (CYPE)

Coefficiente de transmissão térmica de aquecimento: $U=2,28 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ (CYPE)

Comportamento térmico (inferior):

Coefficiente de transmissão térmica de arrefecimento: $U=2,28 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ (CYPE)

Coefficiente de transmissão térmica de aquecimento: $U=1,73 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ (CYPE)

3.4.3 Laje plana acessível

O princípio de construção deste elemento tem como base a laje aligeirada usada entre os pisos. A parte superior é previamente definida pelo software CYPE, uma vez que não foi possível apurar a sua real constituição. Esta é constituída por 9 camadas, formando assim a laje plana acessível descrita de seguida na Figura 3.9 (Tabela 3.3).

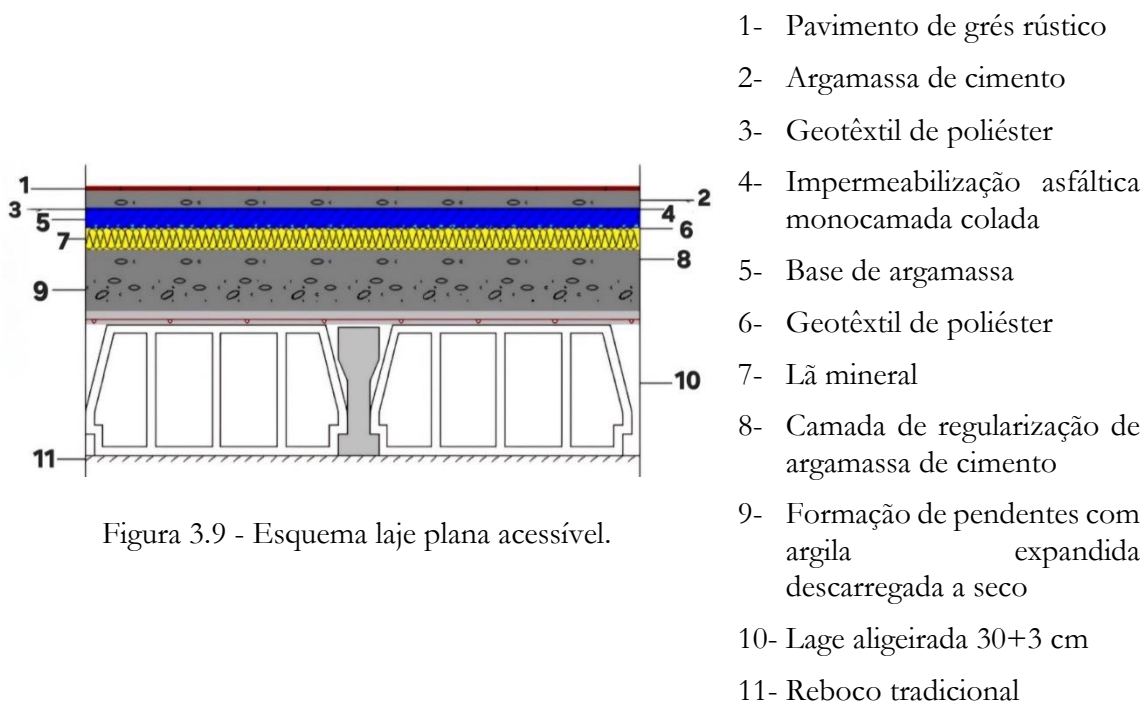


Figura 3.9 - Esquema laje plana acessível.

Tabela 3.3- Propriedades termofísicas da laje plana acessível.

Material	Espessura [cm]	Condutividade Térmica [W/m.K]	Resistência Térmica [m²K/W]	Massa volúmica [kg/m³]	Calor específico [J/kg.K]
1	1	2,3	0,0043	2500	1000
2	4	1,3	0,067	1900	1000
3	0,08	0,038	0,021	250	1000
4	0,36	0,23	0,016	1100	1000
5	4	0,028	1,43	32	1000
6	10	0,22	0,455	690	1000
7	5	0,40	0,125	150	800
8	4	1,3	0,031	1900	1000
9	10	0,12	0,83	600	1000
10	33	-	-	-	-

Coefficiente de transmissão térmico de arrefecimento: $U = 0,34 \text{ W/m}^2\text{.K}$ (CYPE)

Coefficiente de transmissão térmico de aquecimento: $U = 0,35 \text{ W/m}^2\text{.K}$ (CYPE)

3.4.4 Laje plana não acessível

A laje plana não acessível é um elemento não acessível, que serve também de cobertura. Por essa razão, a sua base é também a laje aligeirada na parte inferior. Superiormente esta é constituída por três elementos impermeáveis e isolantes, descritos na Figura 3.10 (Tabela 3.4).

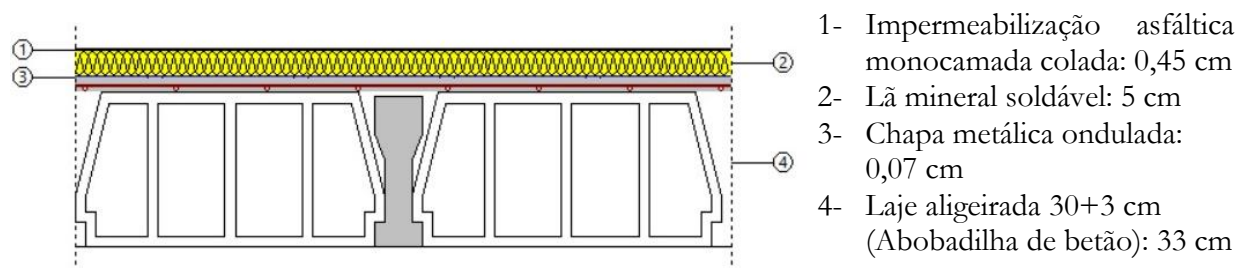


Figura 3.10- Esquema laje plana não acessível.

Tabela 3.4- Propriedades termofísicas da laje plana não acessível.

Material	Espessura [cm]	Condutividade Térmica [W/m.K]	Resistência Térmica [m²K/W]	Massa volúmica [kg/m³]	Calor específico [J/kg.K]
Impermeabilização Asfáltica	0,45	0,23	0,0196	1100	1000
Lã mineral soldável	5	0,038	1,316	150	800
Chapa metálica ondulada	0,07	50	0	7800	450
Laje Aligeirada	33	-	-	-	-
Coefficiente de transmissão térmica de arrefecimento: $U=0,57 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ (CYPE)					
Coefficiente de transmissão térmica de aquecimento: $U=0,59 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ (CYPE)					

3.4.5 Telhado

O telhado desempenha um papel fundamental no desempenho energético do edifício, influenciando diretamente o conforto térmico e a eficiência no consumo de energia. A sua correta conceção e materiais adequados são essenciais para minimizar as perdas térmicas e proteger o edifício das condições climáticas exteriores.

O telhado do edifício segue o padrão descrito na Figura 3.11 (Tabela 3.5).

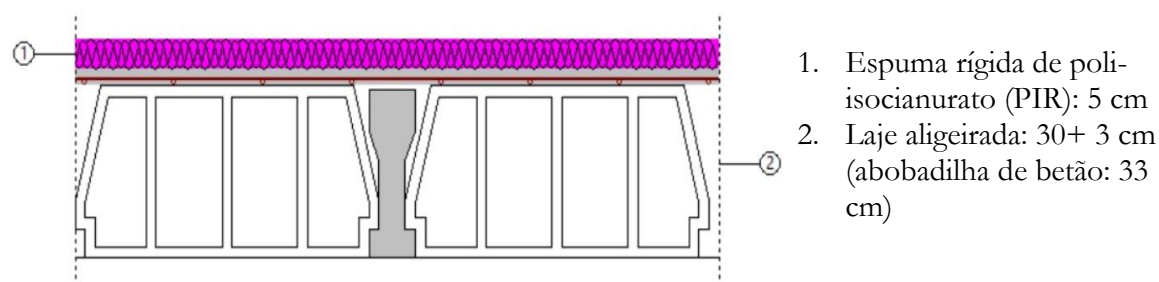


Figura 3.11- Esquema Telhado.

Tabela 3.5- Propriedades termofísicas do telhado.

Material	Espessura [cm]	Condutividade Térmica [W/m.K]	Resistência Térmica [m²K/W]	Massa volúmica [kg/m³]	Calor específico [J/kg.K]
PUR	5	0,030	0,03	40	1400
Laje Aligeirada	33	-	-	-	-

Coefficiente de transmissão térmica de arrefecimento: $U=0.56 \text{ W/m}^2\text{.K}$ (CYPE)

Coefficiente de transmissão térmica de aquecimento: $U=0.58 \text{ W/m}^2\text{.K}$ (CYPE)

3.4.6 Parede exterior

A parede dupla é o tipo de parede exterior mais comum, atualmente, em Portugal. Este sistema é composto por dois panos paralelos de alvenaria, um exterior e outro interior, formando preferencialmente um espaço de ar. A caixa de ar entre os dois panos permite a possível acumulação de água. Esta solução construtiva não é isolada, o que motiva uma medida de melhoria que será posteriormente apresentada. As paredes exteriores do departamento têm uma constituição semelhante à ilustrada na Figura 3.12 (Tabela 3.6). Esta ilustração segue a seguinte ordem de construção, do exterior para o interior.

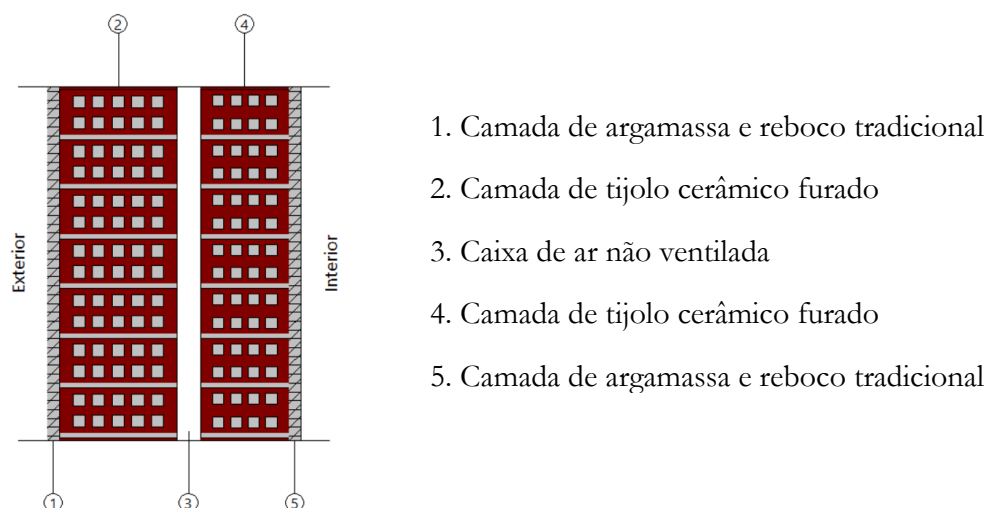


Figura 3.12- Esquema da parede exterior.

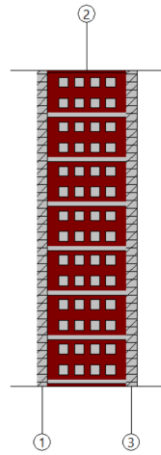
Tabela 3.6- Propriedades termofísicas da parede exterior.

Material	Espessura [cm]	Condutividade Térmica [W/m.K]	Resistência Térmica [m²K/W]	Massa volúmica [kg/m³]	Calor específico [J/kg.K]
Argamassa e reboco tradicional	2	1,3	0,015	2000	10000
Tijolo cerâmico furado	20	0,385	0,519	875,5	1000
Caixa de ar não ventilada	4	-	-	-	-
Tijolo cerâmico furado	15	0,385	0,390	816,7	1000
Estuque tradicional	2	0,400	0,050	1000	1000

Coefficiente de transmissão térmica: $U=0,76 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ (CYPE)

3.4.7 Parede interior

As paredes interiores do edifício são paredes simples, de um pano e têm uma constituição semelhante à ilustrada na Figura 3.13 (Tabela 3.7). A figura segue a ordem de construção, da esquerda para a direita. O comportamento térmico é de $1.72 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$.



1. Camada de estuque de gesso ou areia
2. Camada de tijolo cerâmico furado
3. Camada de estuque de gesso ou areia

Figura 3.13- Esquema parede interior.

Tabela 3.7- Propriedades termofísicas da parede interior.

Material	Espessura [cm]	Condutividade Térmica [W/m.K]	Resistência Térmica [m²K/W]	Massa volúmica [kg/m³]	Calor específico [J/kg.K]
Estuque de gesso ou areia	2	0,8	0,025	1600	1000
Tijolo cerâmico furado	11	0,407	0,270	875,5	1000
Estuque de gesso ou areia	2	0,8	0,250	1600	1000
Coefficiente de transmissão térmico: $U=1,72 \text{ W}/\text{m}^2.\text{K}$ (CYPE)					

3.4.8 Vãos envidraçados

As características dos envidraçados influenciam a condução térmica, a proteção solar, a ventilação natural e a iluminação natural deste edifício. Estes são pontos cruciais tanto para o desempenho energético dos edifícios como para o conforto térmico dos mesmos. No período de verão, o objetivo passa por reduzir os ganhos térmicos, para assim evitar o sobreaquecimento no interior do edifício. Em contrapartida, no período de inverno importa favorecer o aquecimento solar e evitar as perdas de calor através dos vidros e caixilharias.

Todas as janelas do departamento são compostas por um sistema de vidro duplo, consistindo num vidro exterior com 6 mm de espessura, uma câmara de ar com 10 mm, e um vidro interior de 4 mm de espessura. Este sistema apresenta um coeficiente de transmissão térmica (valor U) de $2,90 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ (CYPE).

A caixilharia é o componente estrutural do vão envidraçado que pretende garantir a impermeabilidade ao ar e à água. A seleção adequada da caixilharia contribui para a diminuição do consumo energético do edifício, através da redução das perdas térmicas pelos vãos envidraçados. As caixilharias costumam ocupar cerca de 20% a 30% da área do vão envidraçado. Embora seja uma porção diminuta do vão envidraçado, o desempenho térmico das caixilharias contribui significativamente no coeficiente global de transmissão de calor do vão. (Gonçalves, 2016)

Os perfis de PVC apresentam uma condutibilidade térmica baixa ($0,17 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$) quando comparada com a de outros materiais como o alumínio ($160 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$), proporcionando um melhor isolamento térmico. Uma vez que no edifício as caixilharias são de PVC, podemos concluir que são um excelente componente selecionado. Todos os vãos envidraçados do edifício são equipados com estores interiores.

3.4.9 Portas

As portas instaladas no edifício são de madeira com núcleo oco em colmeia de papel, revestidas com painéis de laminado de alta pressão. Com um valor U de $3,0 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$ (CYPE), estas portas fornecem isolamento térmico básico, contribuindo para a contenção de perdas energéticas nas áreas internas.

3.5 Ocupação do edifício

A ocupação do edifício é um fator essencial na análise do seu desempenho energético, influenciando diretamente as necessidades de climatização e ventilação. Uma elevada taxa de ocupação requer uma atenção especial na gestão energética do edifício para garantir o conforto térmico e a qualidade do ar interior para todos os utilizadores.

Para realizar o estudo foram consideradas taxas de ocupação e distribuição horária de acordo com a Figura 3.14. Foram admitidos estes valores com base no horário de funcionamento de cada compartimento, tendo em conta o número médio de alunos presente em cada aula lecionada. Na distribuição horária considerou-se a manhã e a tarde.

Compartimento	Ocup.	Dist.	Total Horas
Sala M0A2	68	4+7	11
Sala M0A1	32	0+0+4	4
Sala M0S1	30	0+5	5
Sala M0S3	45	4+6	10
SALA ESTUDO DEM	6	3+3	6
Sala EM0S2	35	4+4	8
Sala EM0A1	68	4+6	10
SALA DE ESTUDO DEEM	4	0+3	3
SALA DE MESTRADOS	5	3+0	3
GAB. PRESIDÊNCIA	1	4+3	7
Sala M1S4	30	3+0	3
M1-SALA DOS PROFESSORES	1	1+1	2
SALA REUNIÕES	15	4+0	4
Sala EM1L3 CAD	18	0+7	7
Sala EM1S3 LAB. INF.	25	3+6	9
LAB ELETRO. E POTÊNCIA	15	3+6	9
Sala M1S8	30	0+5	5
GABINETE 1	1	0+2	2
GABIENTE 6	2	1+1	2
GABIENTE 13	1	2+3	5
Sala EM2S7	15	4+0	4
LAB MICROPROCESSADORES	18	3+6	9
Sala EM2S5	25	3+1	4
LAB ROBOCORP	2	0+4	4

Figura 3.14 - Distribuição da ocupação do Edifício

Com base nos horários de ocupação dos compartimentos para cada semestre, foi definida a ocupação dos compartimentos considerando-se uma distribuição diária dos períodos de atividade, dividida entre o período da manhã e o período da tarde. É de notar que no total existem 13 gabinetes, tendo sido representados apenas 3 na Figura 3.14, com base na sua orientação, por uma questão de simplificação.

3.6 Equipamentos Informáticos

Os equipamentos informáticos desempenham um papel significativo no consumo energético de um edifício, contribuindo de forma substancial para o cálculo das cargas internas. A presença constante de computadores, servidores e outros dispositivos eletrónicos gera calor, aumentando as necessidades de climatização e

ventilação para manter o conforto térmico. De acordo com o Decreto-Lei n.º 101-D/2020, é necessário considerar a contribuição dos equipamentos eletrónicos no cálculo das cargas térmicas para se dimensionar corretamente os aparelhos de climatização de forma que se garantam as condições de conforto dos edifícios.

Considerou-se que, no cálculo das cargas térmicas totais dos equipamentos, cada computador possui uma potência de 250 W e cada projetor tem uma potência de 500 W. As cargas térmicas associadas a este tipo de equipamentos por compartimento são apresentadas na Figura 3.15, em [W].

Compartimento	Potência Equipamentos Informáticos [W]
Sala M0A2	750
Sala M0A1	250
Sala M0S1	250
Sala M0S3	250
Sala de Estudo DEM	250
Sala EM0S2	750
Sala EM0A1	750
Sala de Estudo DEEM	250
Sala de Mestrados	750
Gabinete Presidência	250
Sala M1S4	250
M1-Sala de Professores	550
Sala de Reuniões	500
Sala EM1L3 CAD	5000
Sala EM1S3 Lab. Informática	5750
Lab. Eletrónica e Potência	3500
Sala M1S8	250
Gabinete 1	250
Gabinete 6	500
Gabinete 13	250
Sala EM2S7	3750
Lab. Microprocessadores	3150
Sala EM2S5	250
Lab. ROBOCORP	2500

Figura 3.15 - Distribuição das potências nos compartimentos.

3.7 Iluminação

A iluminação também desempenha um papel importante no cálculo das cargas internas de um edifício, contribuindo significativamente para o consumo de energia e o aquecimento interno. O Decreto-Lei n.º 101-D/2020, de 7 de dezembro, que regula o Sistema de Certificação Energética dos Edifícios (SCE), estabelece que a

eficiência da iluminação deve ser considerada no cálculo das necessidades energéticas, uma vez que sistemas de iluminação ineficientes aumentam o consumo energético e afetam as necessidades de climatização. A otimização da iluminação, especialmente com soluções de baixo consumo, como LEDs, é fundamental para reduzir as cargas térmicas e melhorar a eficiência energética global dos edifícios.

A iluminação deste edifício é integralmente assegurada por lâmpadas fluorescentes, instaladas em armaduras com duas lâmpadas de 58 W cada. Na Figura 3.16 são apresentadas o número de armaduras e a potência total da iluminação [W] por compartimento.

Compartimento	Armaduras	Potência iluminação [W]
Sala M0A2	17	1972
Sala M0A1	6	696
Sala M0S1	6	696
Sala M0S3	10	1160
SALA ESTUDO DEM	6	696
Sala EM0S2	10	1160
Sala EM0A1	17	1972
SALA DE ESTUDO DEEM	4	464
SALA DE MESTRADOS	4	464
GAB. PRESIDÊNCIA	1	116
Sala M1S4	8	928
M1-SALA DOS PROFESSORES	6	696
SALA REUNIÕES	6	696
Sala EM1L3 CAD	9	1044
Sala EM1S3 LAB. INF.	15	1740
LAB ELETRO. E POTÊNCIA	8	928
Sala M1S8	8	928
GABINETE 1	1	116
GABINETE 6	2	232
GABINETE 13	1	116
Sala EM2S7	8	928
LAB MICROPROCESSADORES	8	928
Sala EM2S5	8	928
LAB ROBOCORP	6	696

Figura 3.16 - Potência de iluminação por compartimento.

Em todo o edifício, encontram-se instaladas 186 armaduras, resultando numa potência total de 21576 W para iluminação.

3.8 Medições de Consumo

A medição e análise do consumo de energia elétrica são fundamentais para compreender o perfil de consumo do edifício. Neste contexto, onde diversas atividades exigem o uso intensivo de equipamentos de climatização, de iluminação, de equipamentos informáticos e de outras tecnologias, é importante analisar as variações do consumo de energia das cargas ao longo do tempo.

Nesta secção é apresentada uma análise detalhada do consumo de energia elétrica do edifício. Para obter os diagramas de carga elétrica (DDC), ou seja, o perfil de consumo do edifício, foi utilizado e instalado no quadro elétrico do edifício um analisador de energia trifásico da marca *PeakTech* (Figura 3.17). Este equipamento permite um conjunto de medições de grandezas elétricas, mas para este estudo em questão a grandeza que se pretende monitorizar é o da potência ativa ou seja da potência consumida ao longo do tempo.



Figura 3.17 – Analisador de energia trifásico da marca *PeakTech*.

Foram realizadas medições em três períodos distintos do ano, durante cerca uma semana para cada período, com um intervalo de 15 em 15 minutos. Os períodos de monitorização foram:

- Meia estação - 9 a 12 de março de 2023 (Figura 3.18)
- Estação quente - 22 a 29 de junho de 2023 (Figura 3.19)
- Estação fria - 12 a 21 de dezembro de 2023 (Figura 3.20)

Nas figuras referidas, para além do perfil de carga do edifício está também representado, para os mesmos períodos, o perfil de carga do ISEC, de forma a se poderem comparar os dados de consumo do Edifício com os dados do consumo global do ISEC. O perfil de carga do ISEC retirado da plataforma E-Redes. O objetivo é determinar o peso do consumo do edifício no consumo global. É importante notar que cada perfil é apresentado com a sua própria escala para melhor visualização dos dados.

Na Figura 3.18, pode ser observado o perfil de consumo de 9 a 12 de março de 2023, da meia estação.

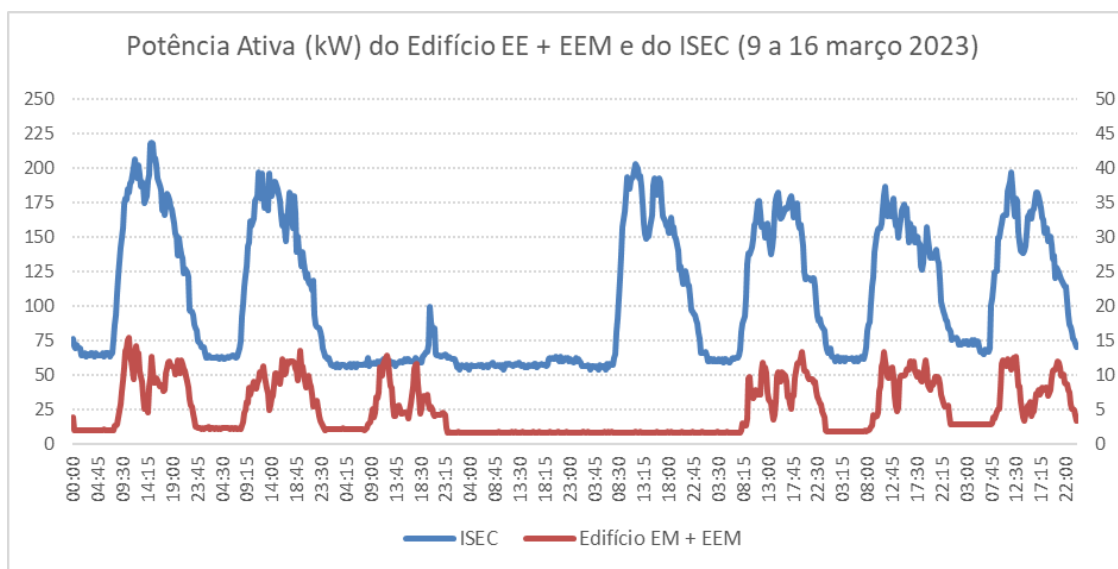


Figura 3.18 – Diagrama de Carga do Edifício e do ISEC (9 a 16 de março 2023).

De salientar que no sábado 11 de março 2023, o Edifício esteve ocupado pela empresa MondegoPeças para efeitos de formação. No dia 13 de março de 2023, o Edifício esteve fechado e daí não se registarem consumos durante o dia.

Neste período o consumo do edifício foi de 947 kWh o que representou 4,7% do consumo total do ISEC, que foi de 20165 kWh. As potências ativas, média, média diária e de pico do edifício foram respetivamente 4,9kW, 6,9 kW e 15,4 kW.

Na Figura 3.19, pode ser observado o perfil de consumo de 22 a 29 de junho de 2023, da estação quente. Observa-se uma ligeira redução no consumo de energia no período entre 22 e 29 de junho, em comparação com o período de março, a nível do edifício. Essa redução é consistente com as variações sazonais típicas, uma vez que, durante o período de junho, as temperaturas externas são geralmente amenas, não havendo ainda grandes necessidades de arrefecimento, devido à própria inércia dos edifícios. Além disso, o maior número de horas de luz natural no verão reduz a

necessidade de iluminação artificial, contribuindo para uma diminuição do consumo energético. Por outro lado, corresponde já ao período de exames levando a uma menor ocupação dos espaços.

Neste período o consumo do edifício foi de 905 kWh o que representou 3,1% do consumo total do ISEC, que foi de 29310 kWh. As potências ativas, média, média diária e de pico do edifício foram respetivamente 2,9 kW, 4,1 kW e 14,6 kW.

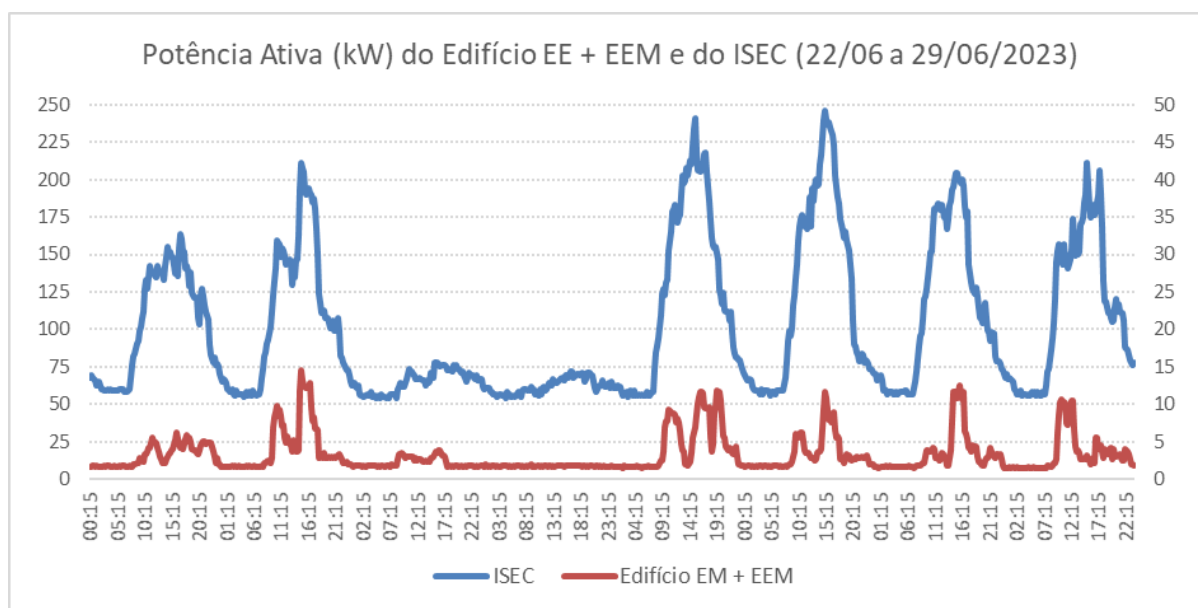


Figura 3.19- Diagrama de Carga do Edifício e do ISEC (22 a 29 de junho 2023)

Na Figura 3.20, pode ser observado o perfil de consumo de 12 a 21 de dezembro de 2023, da estação fria.

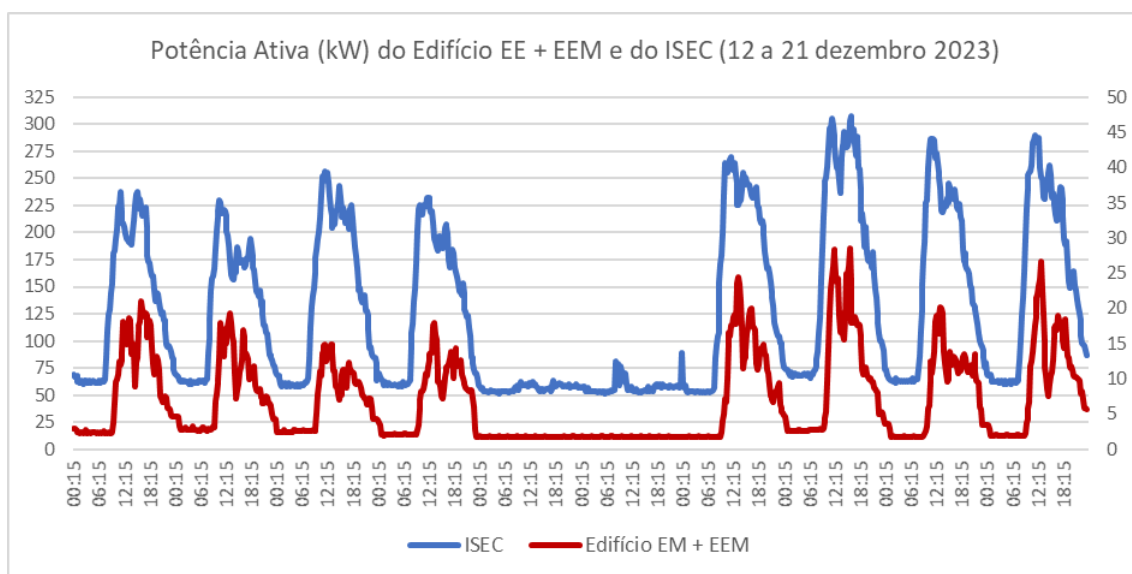


Figura 3.20- Diagrama de Carga do Edifício e do ISEC (12 a 21 de dezembro 2023).

Ao comparar os perfis de consumo entre março e dezembro, observa-se um aumento considerável no consumo de energia durante o período de dezembro, característico da estação fria. Este fenómeno é explicado pela necessidade de aquecer o edifício, o que intensifica o uso de sistemas de climatização e aumenta a carga energética.

Adicionalmente, a presença de aquecedores a óleo nos gabinetes dos docentes contribui significativamente para este aumento, uma vez que estes dispositivos são frequentemente utilizados para manter o conforto térmico em espaços menores. Durante os meses mais frios, a necessidade de aquecimento é naturalmente superior, o que se reflete num perfil de consumo mais elevado.

Neste período o consumo do edifício foi de 1655 kWh o que representou 5,4% do consumo total do ISEC, que foi de 30577 kWh. As potências ativas, média, média diária e de pico do edifício foram respetivamente 6,9 kW, 10,9 kW e 28,5 kW.

Com base nos dados dos três períodos de monitorização em conjunto foi possível determinar que o consumo do edifício representou 4,4% do consumo global do ISEC, nos períodos equivalentes. Também se obteve, para esse conjunto de medições, o consumo diário médio (considerando fins de semana) do ISEC que é de 2583 kWh/dia e o consumo diário médio real do Edifício que é de 113 kWh/dia.

De referir que os diagramas de carga apresentados são consistentes com o período de funcionamento do ISEC e do edifício, que é das 8h às 24h durante os dias úteis, logo grande parte do consumo do ISEC dá-se durante o período das tarifas de eletricidade mais caras, como se apresenta de seguida.

Para além do consumo de energia é de grande interesse saber qual o custo dessa energia, visto que é com base nessa informação que se pode determinar a viabilidade económica de possíveis medidas de melhoria a serem implementadas.

O ISEC tem um contrato de fornecimento de eletricidade com a EDP Comercial – Comercialização de Energia, S.A., que é um comercializador em regime livre. O contrato de abastecimento de eletricidade é em média tensão, com tarifa tetra-horária e com um ciclo horário semanal com feriados. A tarifa tetra-horária corresponde a 4 períodos distintos do dia e cada um com custos distintos por kWh para a energia consumida e para a utilização das redes. Estes dois custos, energia e utilização das redes, somados dá o custo total por kWh de energia consumida para cada período, como se apresenta na Tabela 3.8. De referir que ao custo deve ser acrescentado o valor do IVA de 23%.

Tabela 3.8- Custo de energia elétrica por período horário contratado (EDP, 2024).

Período Horário	Energia €/kWh	Redes €/kWh	Custo s/IVA €/kWh	Custo c/IVA €/kWh
Vazio (SV)	0,1630	0,0158	0,1788	0,2199
Vazio Normal (VN)	0,1650	0,0180	0,1830	0,2251
Ponta (P)	0,1780	0,0248	0,2028	0,2494
Redes Cheia (C)	0,1750	0,0225	0,1975	0,2429

No Ciclo semanal os períodos horários são diferentes nos dias úteis e aos fins de semana, como se pode verificar pela Figura 3.21. No caso de abastecimento em Média Tensão, Alta Tensão e Muito alta tensão consideram-se os feriados nacionais como domingos.

Período de hora legal de Inverno		Período de hora legal de Verão	
De segunda-feira a sexta-feira		De segunda-feira a sexta-feira	
Ponta:	09.30/12.00 h 18.30/21.00 h	Ponta:	09.15/12.15 h
Cheias:	07.00/09.30 h 12.00/18.30 h 21.00/24.00 h	Cheias:	07.00/09.15 h 12.15/24.00 h
Vazio normal:	00.00/02.00 h 06.00/07.00 h	Vazio normal:	00.00/02.00 h 06.00/07.00 h
Super vazio:	02.00/06.00 h	Super vazio:	02.00/06.00 h
Sábado		Sábado	
Cheias:	09.30/13.00 h 18.30/22.00 h	Cheias:	09.00/14.00 h 20.00/22.00 h
Vazio normal:	00.00/02.00 h 06.00/09.30 h 13.00/18.30 h 22.00/24.00 h	Vazio normal:	00.00/02.00 h 06.00/09.00 h 14.00/20.00 h 22.00/24.00 h
Super vazio:	02.00/06.00 h	Super vazio:	02.00/06.00 h
Domingo		Domingo	
Vazio normal:	00.00/02.00 h 06.00/24.00 h	Vazio normal:	00.00/02.00 h 06.00/24.00 h
Super vazio:	02.00/06.00 h	Super vazio:	02.00/06.00 h

Figura 3.21- Distribuição horária dos períodos contratados (ERSE,2023).

Os departamentos do ISEC abrem às 8h da manhã e fecham às 24h, pelo que se pode afirmar que os principais consumos de energia, que estão associados à climatização, iluminação, equipamentos informáticos, equipamentos de laboratórios entre outros, se verificam nesse período horário, o que corresponde a horas cheias e a horas de ponta.

Durante os dias úteis, que são os dias de funcionamento do ISEC, e durante as 16h que o ISEC está aberto, no período de Inverno, 5 das horas são horas de ponta e 11 das horas são horas cheias e, no período de Verão, 3 das horas são horas de ponta e 13 das horas são horas cheias. Com base nesta informação, optou-se por considerar, para efeitos da análise económica, que é feita no capítulo 6, nomeadamente para determinar a poupança de custos associado às poupanças de energia elétrica, que o custo da eletricidade é o correspondente ao das horas cheias, que é de 0,1975 €/kWh + IVA, ou seja, de 0,2429 €/kWh. A diferença de custo quando comparado com as horas de ponta é de somente 0,0065€/kWh, o que não justifica a distinção dos períodos.

4 CRIAÇÃO DO MODELO 3D NO SOFTWARE CYPE

Para analisar o desempenho energético do edifício em estudo, foi desenvolvido um modelo tridimensional utilizando o *software* CYPE, uma ferramenta especializada na simulação e cálculo de eficiência energética e de comportamento térmico de edifícios. A criação do modelo 3D do edifício é fundamental para reproduzir de forma precisa as características construtivas e funcionais, permitindo uma análise detalhada das cargas térmicas e de outros fatores que influenciam o consumo energético.

A modelação no CYPE inclui a caracterização de todos os elementos do edifício, como materiais de construção, espessuras das paredes, janelas, sistemas de climatização, e cargas internas, como iluminação e equipamentos informáticos. Essa modelação é essencial para garantir que os cálculos térmicos e de eficiência energética sejam realistas e precisos, fornecendo uma base sólida para a aplicação de melhorias e assim obter uma otimização do desempenho energético do edifício.

Para o caso de estudo, foi utilizada a versão de estudante do software, que, embora apresente funcionalidades adequadas para a realização de análises e simulações, possui algumas limitações em comparação com a versão profissional.

4.1 Definição e caracterização do tipo de edifício

Neste capítulo, dá-se início à caracterização do edifício. A caracterização abrange a definição dos principais elementos construtivos, como a envolvente opaca, os vãos envidraçados, os sistemas de climatização e iluminação.

Ao iniciar um novo estudo, é necessário selecionar o país em que se localiza este edifício, como demonstra a Figura 4.1.

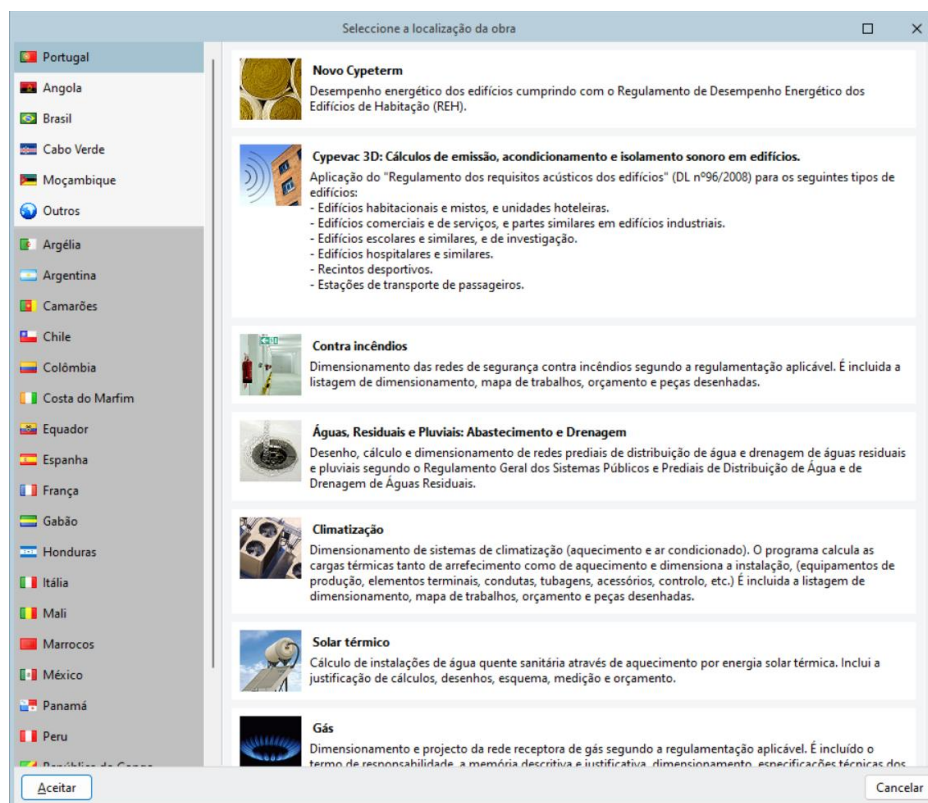


Figura 4.1- Seleção do país da localização do Edifício no *software* CYPE.

Após a seleção do país onde o edifício está localizado, surge o menu apresentado na Figura 4.2. Para este estudo, será selecionada a opção "Obra vazia", uma vez que não se dispõe de nenhum modelo CAD/BIM pré-existente. Assim, o edifício terá de ser modelado inteiramente de raiz.



Figura 4.2- Seleção do “Tipo de Obra” no *software* CYPE.

Após a seleção do tipo de obra, é necessário definir o tipo de edifício. Na Figura 4.3, são apresentados todos os tipos de edifícios disponíveis para modelação no *software*. Para este estudo, seleciona-se o tipo "Docente", de forma a criar o modelo 3D correspondente ao edifício em estudo.

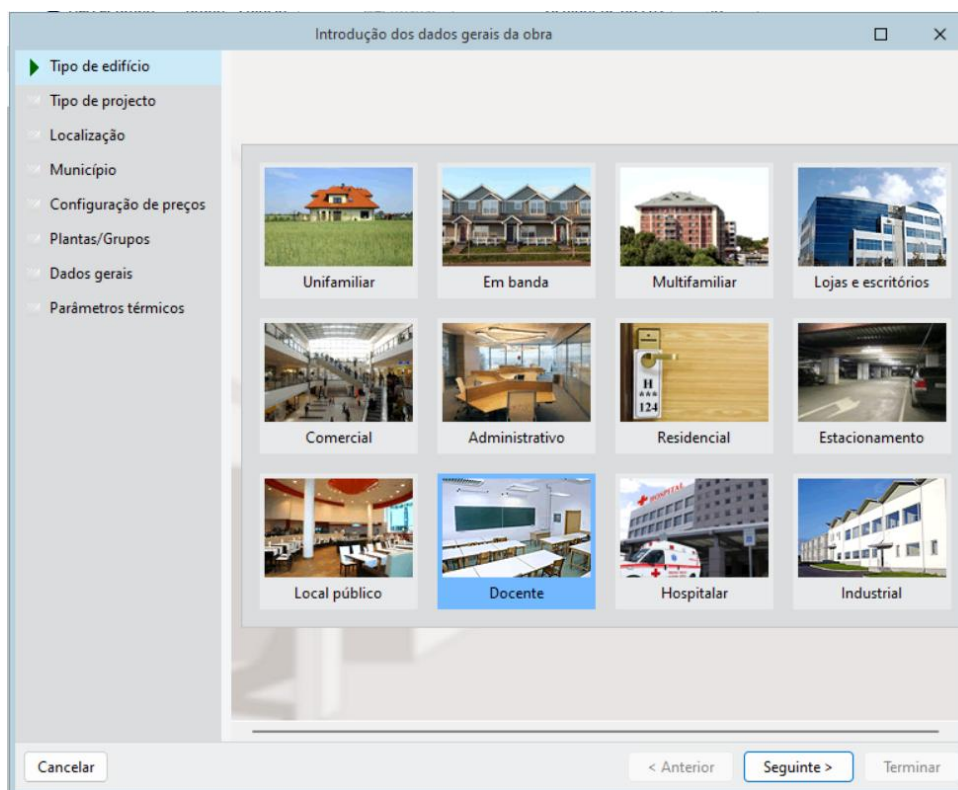


Figura 4.3- Seleção do "Tipo de Edifício" no *software* CYPE.

Para cumprir com o objetivo deste trabalho, no menu seguinte, que solicita a seleção do tipo de projeto, representado na Figura 4.4, seleciona-se a opção "Novo Cypeterm". Embora a escolha neste menu não seja limitante, dado que serão utilizados tanto o "Novo Cypeterm" como o módulo de "Climatização", é importante mencionar as suas funções. No tipo de projeto "Novo Cypeterm", obtêm-se as necessidades energéticas com base na caracterização do edifício. Já no tipo de projeto "Climatização", são calculadas as cargas de aquecimento e arrefecimento, essenciais para o dimensionamento adequado dos sistemas de climatização.

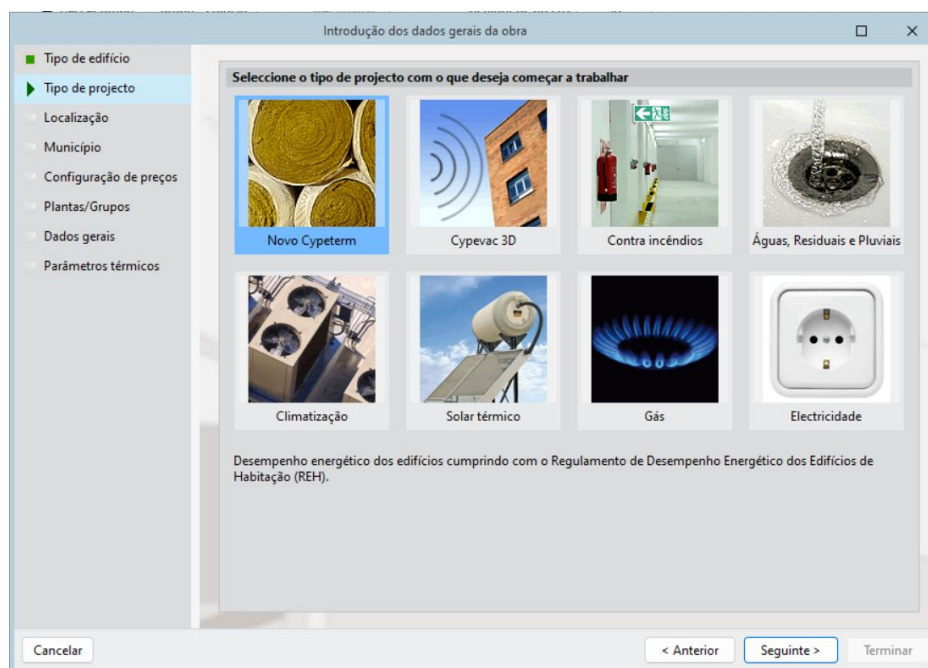


Figura 4.4- Seleção do “Tipo de Projeto” no *software* CYPE.

A localização do edifício deve ser indicada corretamente devido à sua influência direta no desempenho energético, uma vez que fatores climáticos, como temperatura, humidade e radiação solar, variam significativamente entre regiões. No menu apresentado na Figura 4.5, seleciona-se o distrito certo, neste caso, Coimbra, para garantir que as simulações energéticas considerem as condições climáticas locais, permitindo uma avaliação precisa das necessidades de aquecimento, arrefecimento e consumo energético do edifício. Para efeito de cálculo das necessidades energéticas, o *software* utiliza uma base de dados com valores climáticos de um ano típico.

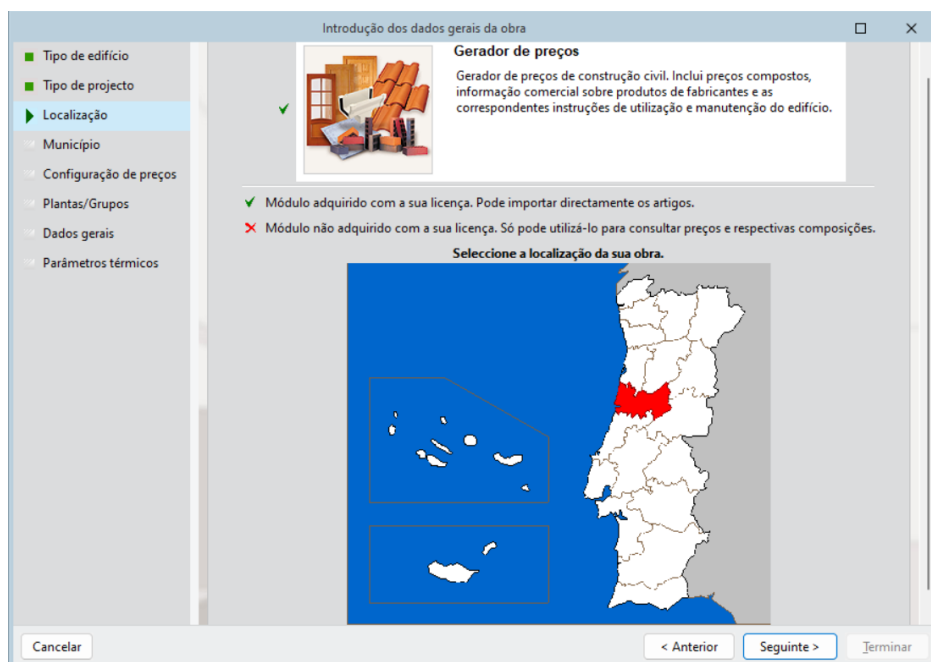


Figura 4.5- Seleção do distrito da localização do Edifício no *software* CYPE.

Uma vez definida a localização, é necessário caracterizar o edifício, definindo o número de pisos e o seu pé direito. Na Figura 4.6, é apresentado o respetivo menu desta caracterização.

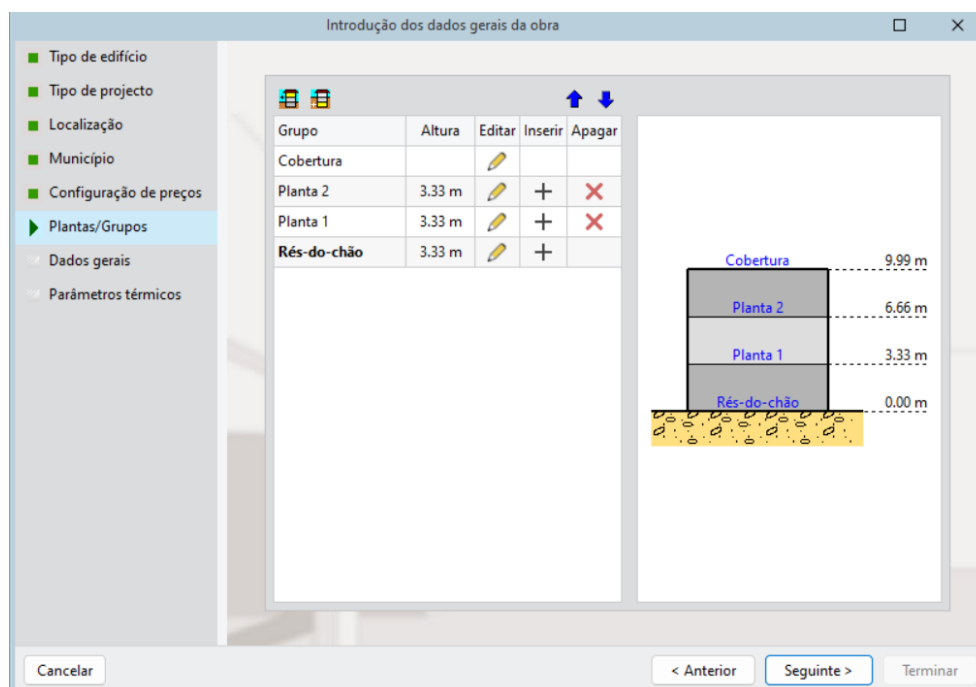


Figura 4.6- Caracterização dos pisos no *software* CYPE.

4.2 Importação das plantas do edifício

A modelação 3D do edifício é iniciada com o carregamento das plantas em formato digital respetivas a cada piso, para se poder modelar o edifício de forma correta com todas as dimensões e localizações de cada compartimento e a sua envolvente. A Figura 4.7, representa o menu da adição e atribuição das plantas aos respetivos pisos.

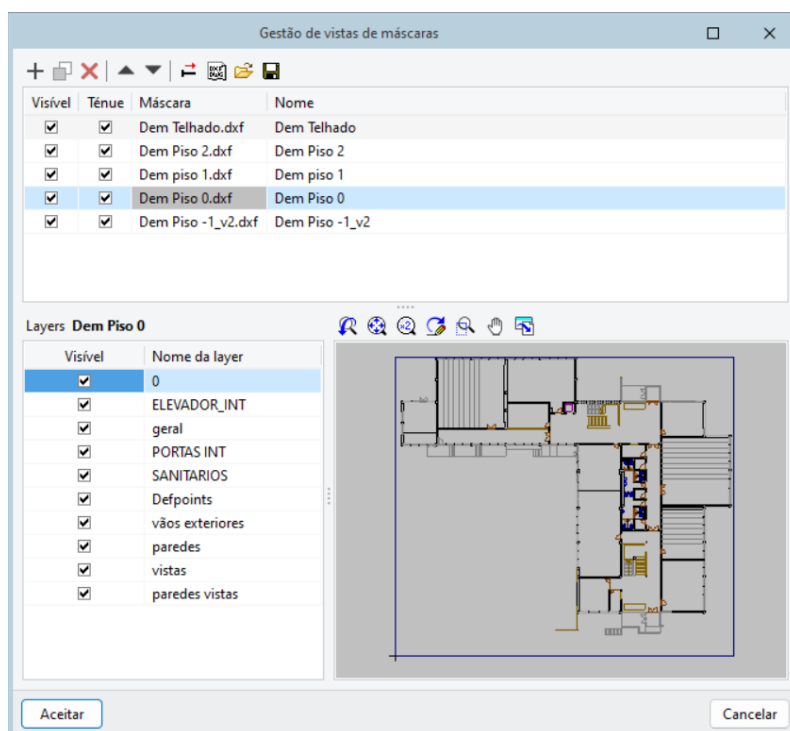


Figura 4.7- Importação e atribuição das plantas no *software* CYPE.

Com todos os pisos definidos e as respetivas plantas atribuídas, estão reunidas as condições necessárias para proceder à definição dos elementos construtivos. Na Figura 4.8, é apresentado o menu onde se especificam esses elementos. A título de exemplo, será detalhada a constituição em camadas da parede exterior do edifício. Este processo é repetido para definir a composição de toda a envolvente do edifício, garantindo que cada elemento construtivo é corretamente caracterizado em termos de isolamento térmico, materiais e espessuras, para uma simulação energética precisa.

Parede exterior

Referência
Parede Exterior

Descrição
Parede Exterior DEM

☐ Parede genérica ☒ Parede por camada

Revestimento exterior Primeiro pano ☒ Caixa de ar ☒ Segundo pano ☒ Revestimento interior Remate de laje

Camadas	e (cm)	λ (W/(m·°C))	ρ (kg/m³)
Argamassa e reboco não tradicional	2.00	0.550	1200.0

☐ Caracterização acústica

☐ Pontes térmicas lineares em janelas

☐ Pontes térmicas planas em janelas

☐ Existe contacto do isolante térmico com a caixilharia

Tipo de solução de envolvente: Parede simples sem isolamento térmico

Aceitar Cancelar

Figura 4.8- Caracterização e definição dos elementos construtivos no *software* CYPE.

Após a definição de todos os elementos da envolvente e a sua correta inserção no *software*, posicionados de acordo com a planta, a modelação 3D do edifício está concluída. O resultado da modelação pode ser visualizado na Figura 4.9, representando a estrutura do edifício.

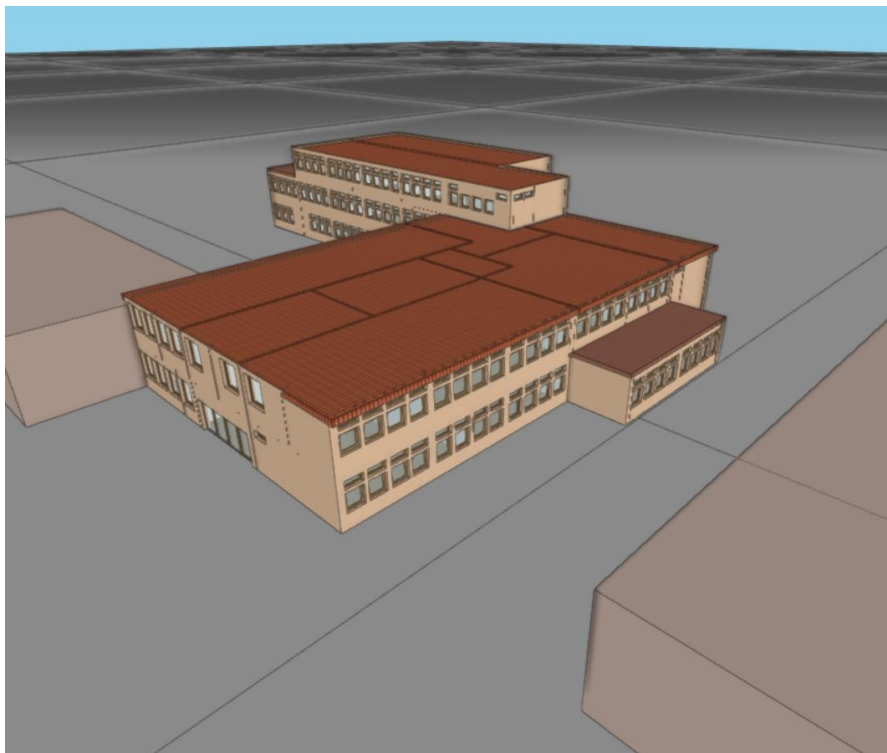


Figura 4.9- Representação 3D do Edifício modelado no *software* CYPE.

4.3 Definição dos sistemas de climatização

Para que o CYPE calcule corretamente as necessidades energéticas do edifício, é necessário definir os sistemas de referência a serem considerados. Estes sistemas servem como base comparativa para os valores obtidos nos cálculos energéticos. Na Figura 4.10, é apresentado o tipo de sistema selecionado para o cálculo das necessidades de aquecimento, sendo aplicado o mesmo procedimento para determinar as necessidades de arrefecimento. Estes dados são aplicáveis a todos os compartimentos da fração autónoma, que inclui o edifício de mecânica e o edifício de eletromecânica.

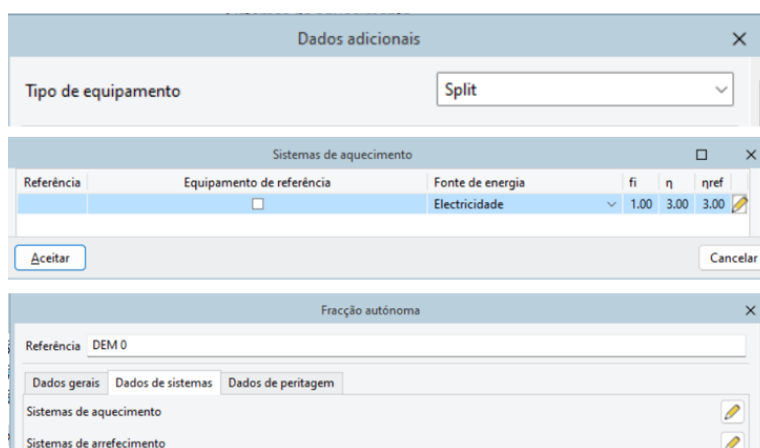


Figura 4.10- Menu de definição de Sistemas de Climatização no *Software* CYPE.

Com a caracterização e modelação do edifício concluídas, pode-se dar início ao estudo da sua eficiência energética e à realização do levantamento detalhado das necessidades energéticas e das cargas térmicas. Na Figura 4.11, é apresentado o menu de cálculo do programa, a partir do qual serão executadas as simulações para determinar os consumos energéticos e avaliar o desempenho térmico do edifício, com base nas condições previamente definidas.

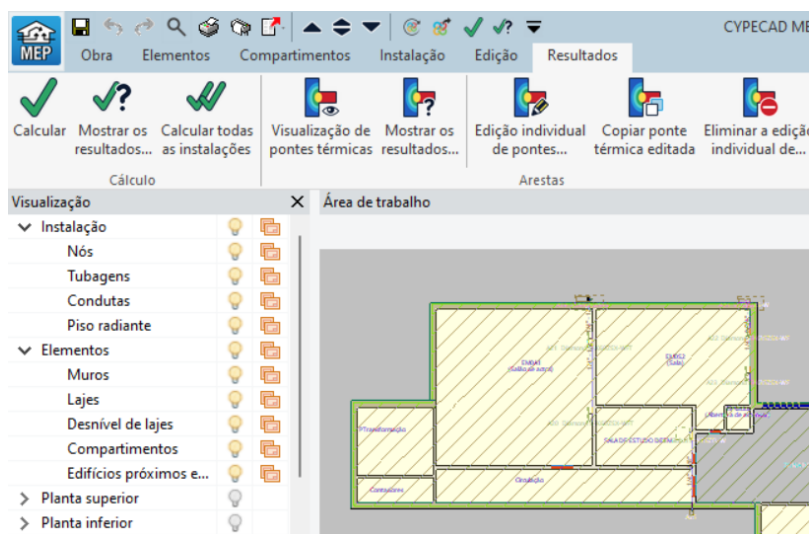


Figura 4.11- Menu de cálculos do *Software* CYPE.

5 CÁLCULO DAS NECESSIDADES ENERGÉTICAS DO EDIFÍCIO

O conforto térmico é especialmente importante em edifícios de serviços, uma vez que afeta a qualidade do ambiente interior e o desempenho dos ocupantes. As condições para conforto térmico indicam que a temperatura ideal deve ser de 20°C no inverno e 25°C no verão, de acordo com a legislação em vigor, o Decreto-Lei n.º 101-D/2020.

A análise das necessidades energéticas segue o enquadramento legislativo vigente, nomeadamente o Decreto-Lei n.º 101-D/2020, que estabelece os requisitos de desempenho energético e conforto térmico para edifícios de serviços, com o objetivo de garantir um ambiente eficiente e confortável.

No cálculo das necessidades energéticas de um edifício de serviços, como é o caso do edifício em estudo, tem influência a localização e orientação do edifício, os equipamentos de climatização, de iluminação, equipamentos eletrónicos, AQS, ventilação e ocupação dos espaços (DL 101-D/2020).

5.1 Necessidades de Energia Útil

As necessidades de energia útil referem-se à quantidade de energia diretamente utilizada para garantir o conforto térmico, ventilação, iluminação e o funcionamento dos equipamentos no edifício. Esta energia é necessária para manter as condições ideais para aquecimento e arrefecimento do espaço útil do edifício, sendo diretamente influenciada pela eficiência dos sistemas instalados, que no caso são sistemas de referência. Na Figura 5.1 estão apresentados os valores do edifício de referência e da análise das necessidades de energia útil do edifício em estudo, tendo em conta as suas características construtivas e a sua ocupação para o modelo base e que no cálculo são considerados valores climáticos do Ano Climático Meteorológico (TMY) (CYPE, 2024).

Modelo/Versão	Base	Referência	Unidades
Ni Aquecimento	58,19	53,1	kWh/m ² .ano
Nv Arrefecimento	4,53	9,23	kWh/m ² .ano
Total	62,72	62,33	kWh/m ² .ano
Nec. E.E	20,91	20,78	kWh/m ²
Nec. E.E Edifício	36733,01	36504,60	kWh

Figura 5.1 - Necessidades energéticas do Edifício (modelo Base e Referência).

Tendo em conta o modelo base que considera a situação atual do edifício, os resultados obtidos são esperados, pois este apresenta um valor elevado para as necessidades de aquecimento, algo que pode ser justificado pela ausência de isolamento na envolvente. As necessidades de energia útil para aquecimento em Coimbra são superiores às de arrefecimento devido às condições climáticas médias

do TMY, que mostra invernos com temperaturas exteriores significativamente baixas, resultando em maiores perdas térmicas e maior necessidade de aquecimento. Em contraste, os verões têm temperaturas elevadas, mas menos extremas e com noites mais frescas, reduzindo a necessidade de arrefecimento.

5.2 Cargas térmicas de aquecimento e arrefecimento

As cargas de aquecimento e arrefecimento referem-se à energia necessária para aquecer ou arrefecer um edifício, de forma a manter a temperatura interna nos níveis de conforto térmico. As cargas de aquecimento garantem que o edifício permaneça aquecido nos meses frios, enquanto as cargas de arrefecimento controlam a temperatura interna durante os períodos quentes. O cálculo destas cargas envolve vários fatores, como a envolvente do edifício, isolamento térmico, ganhos solares e a ocupação do espaço (ASHRAE Handbook – Fundamentals, 2017). Para obter resultados, também neste cálculo, é considerado o TMY para a zona.

Na Figura 5.2 são apresentados os valores, em [W], correspondentes às cargas térmicas de aquecimento e arrefecimento do modelo base para os compartimentos do DEM. De notar que existem 13 gabinetes, mas por uma questão de simplificação, são apresentados apenas 3. O total das potências tem em conta os 13 gabinetes.

Compartimento	Arref.	Aque.
Sala M0A2	12130	3823
Sala M0A1	5578	2309
Sala M0S1	5465	2386
Sala M0S3	7329	3092
SALA ESTUDO DEM	2455	1791
Sala EM0S2	6888	2795
Sala EM0A1	10276	3344
SALA DE ESTUDO DEEM	1134	800
SALA DE MESTRADOS	1979	2010
GAB. PRESIDÊNCIA	1608	1840
Sala M1S4	4495	4092
M1-SALA DOS PROFESSORES	2731	2130
SALA REUNIÕES	3222	2311
Sala EM1L3 CAD	9429	3150
Sala EM1S3 LAB. INF.	11829	4051
LAB ELETRO. E POTÊNCIA	8069	3059
Sala M1S8	5087	3163
GABINETE 1	702	1112
GABINETE 6	1543	1214
GABINETE 13	750	1039
Sala EM2S7	8584	3687
LAB MICROPROCESSADORES	7847	2778
Sala EM2S5	4299	2135
LAB ROBOCORP	4161	1946
Total	136863	69322

Figura 5.2- Cargas térmicas do modelo base do Edifício.

Os resultados obtidos mostram a existência de cargas de arrefecimento teoricamente altas em alguns dos compartimentos. Estes resultados devem-se principalmente à elevada ocupação, ao tipo de sistema de iluminação instalado e à envolvente como é o caso, por exemplo, do compartimento M0A2, demonstrado na Figura 5.3.

Compartimento		Conjunto de compartimentos							
M0A2(M0A2)		DEMO							
Condições de projecto									
Internas				Externas					
Temperatura interior= 25.0°C				Temperatura exterior= 31.9°C					
Humidade relativa interior= 50.0%				Temperatura húmida= 22.4°C					
Cargas de arrefecimento às 17h (15 hora solar) do 15 de Setembro							C. LATENTE (W)	C. SENSÍVEL (W)	
Envolventes exteriores									
Tipo	Orientação	Superfície (m²)	U (W/(m².°C))	Peso (kg/m²)	Cor	Teq. (°C)			
Fachada	SE	13.4	0.76	332	Clara	25.2		1.77	
Fachada	SW	18.5	0.76	332	Clara	25.2		2.77	
Fachada	NW	13.5	0.76	332	Clara	24.4		-5.81	
Envidraçados exteriores									
Núm. janelas	Orientação	Superfície total (m²)	U (W/(m².°C))	Coef. radiação solar	Ganho (W/m²)				
8	SW	11.5	2.63	0.24	135.4			1559.49	
8	SW	4.8	3.10	0.37	164.5			789.47	
Coberturas									
Tipo	Superfície (m²)	U (W/(m².°C))	Peso (kg/m²)	Cor	Teq. (°C)				
Plana	46.9	0.34	680	Média	29.7			75.92	
Envolventes interiores									
Tipo	Superfície (m²)	U (W/(m².°C))	Peso (kg/m²)	Teq. (°C)					
Parede interior	49.7	1.52	211	24.9				-7.51	
Abertura interior	3.3	1.90		28.4				21.94	
							Total estrutural	2438.03	
Ocupantes									
Actividade	Nº de pessoas	C.lat/per (W)	C.sen/per (W)						
Sentado ou em repouso	68	37.23	59.13				2531.68	4020.69	
Iluminação									
Tipo	Potência (W)	Coef. iluminação							
Fluorescente com reactância	1972.00	1.07						2110.04	
Instalações e outras cargas									
								750.00	
Cargas interiores							2531.68	6880.73	
Cargas interiores totais								9412.41	
Cargas devidas à própria instalação							3.0 %	279.56	
FACTOR CALOR SENSÍVEL : 0.79							Cargas internas totais	2531.68	9598.33
							Potência térmica interna total		12130.00
							Potência térmica	2531.68	9598.33
POTÊNCIA TÉRMICA POR SUPERFÍCIE 135.4 m²							89.6 W/m²	POTÊNCIA TÉRMICA TOTAL : 12130.0 W	

Figura 5.3- Listagem das cargas térmicas para arrefecimento do compartimento M0A2.

Os valores obtidos têm uma causa comum, já que os compartimentos com as maiores cargas de arrefecimento são, em geral, salas ou anfiteatros que apresentam uma elevada carga associada à iluminação, uma carga interna significativa devido à ocupação, e uma grande carga gerada pelo número de equipamentos eletrónicos em utilização. Além disso, a orientação destes espaços contribui para ganhos térmicos elevados através da envolvente, aumentando as necessidades de arrefecimento.

As cargas de aquecimento também se consideram altas, o que se justifica pela ausência de isolamento do edifício.

De salientar que é muito importante pensar em medidas de melhoria que permitam uma diminuição das cargas de arrefecimento, principalmente quando se pretende dimensionar equipamentos de climatização reversíveis que satisfaçam as funções de aquecimento e arrefecimento, visto que a potência do equipamento deverá corresponder à situação de maior exigência.

6 MEDIDAS DE MELHORIA E ANÁLISE DE RESULTADOS

As medidas de melhoria que são propostas neste estudo têm como objetivo aumentar a eficiência energética do edifício, reduzindo o seu consumo de energia. Tendo por base a análise das necessidades energéticas e no desempenho atual do edifício, neste capítulo são apresentadas e estudadas soluções como a substituição da iluminação existente, a aplicação de isolamento térmico na envolvente opaca exterior, a aplicação de mecanismos de climatização passiva, a substituição dos equipamentos de climatização e a instalação de painéis fotovoltaicos (FV) para autoconsumo.

Para determinar a viabilidade económica das medidas de melhoria propostas e de forma a quantificar as poupanças energéticas que advém da sua aplicação, considerou-se um modelo base com equipamentos de ar condicionado reversíveis com a eficiência de referência prevista na legislação, ou seja, um SCOP de 3 para o modo de aquecimento e um SEER de 3 para o modo de arrefecimento. Estes sistemas foram aplicados em todos os espaços climatizados da fração autónoma (edifício), nomeadamente, salas de aulas, gabinetes de docentes, laboratórios e outras salas.

De referir, que para a climatização os sistemas estudados são todos eles sistemas de ar condicionado e por isso sistemas elétricos, indo ao encontro da estratégia da UE para a eletrificação dos edifícios, para diminuir a dependência energética dos combustíveis fósseis. Desta forma, as poupanças obtidas serão poupanças de eletricidade. Para efeitos de cálculo da poupança económica associada à poupança de energia, e como já explicado na secção 3.8, vai ser utilizado a tarifa de eletricidade 0.1975€/kWh + IVA.

As medidas de melhoria da envolvente afetam diretamente as necessidades de energia útil para a climatização dos espaços, assim como as potências térmicas a instalar, fazendo por isso sentido apresentar em primeiro lugar o estudo dessas medidas. Com base na redução dessa energia útil é possível quantificar a poupança de energia associada à aplicação dessas medidas. No entanto, a nível da determinação das cargas térmicas para arrefecimento, para além das características da envolvente, têm grande influência a ocupação dos espaços e a iluminação. Por essa razão, optou-se por determinar em primeiro lugar qual o impacto de substituir as lâmpadas fluorescentes tubulares por lâmpadas do tipo LED a nível das necessidades de arrefecimento.

De forma a auxiliar a interpretação dos resultados apresentados nas secções seguintes, serão numeradas as melhorias aplicadas de acordo com a Figura 6.1. Na coluna do lado direito é dada a indicação da comparação das medidas de melhoria para efeitos de análise de resultados.

Medidas	Descrição da medida de melhoria	Resultados
0	Modelo Base/Situação atual	
1	Substituição da Iluminação	1-0
2	Isolamento na Parede Exterior	2-1
3	Palas de Sombreamento Total	3-2
4	Palas de Sombreamento Parcial (SP)	4-3
5	Vidros Baixa Emissividade Total + SP	5-4
6	Vidros Baixa Emissividade Parcial + SP	6-5
7	Vidros Baixa Emissividade	7-5/7-4/7-2

Figura 6.1- Numeração e identificação das medidas de melhoria aplicadas.

6.1 Iluminação

A primeira medida de melhoria a implementar no edifício será a substituição do sistema de iluminação atual, composto por lâmpadas fluorescentes, por lâmpadas do tipo LED (**Medida 1**). As lâmpadas LED apresentam como grande vantagem o seu reduzido consumo de energia quando comparadas com as lâmpadas fluorescentes tubulares. Em média, as lâmpadas LED consomem até menos 50% eletricidade do que as lâmpadas fluorescentes, mantendo a intensidade luminosa, o que resulta numa redução direta dos custos energéticos. Além disso, as lâmpadas LED possuem uma vida útil muito superior, o que diminui a frequência de substituições e reduz os custos de manutenção a longo prazo (Relatório Técnico da ADENE).

Desta forma, estudou-se a implementação desta melhoria com o objetivo de quantificar a diminuição das cargas térmicas de arrefecimento e a poupança energética associada, tendo-se constatado uma redução significativa em comparação com o modelo de base atual, como se pode verificar pelos valores, em [W], obtidos e apresentados na Figura 6.2.

Compartimento	1- Iluminação [W]		
	Arref.	Aque.	Dif. Arref. (1-0)
Sala M0A2	10856	3823	-1274
Sala M0A1	5364	2309	-214
Sala M0S1	4910	2386	-555
Sala M0S3	6636	3092	-693
Sala de Estudo DEM	2249	1791	-206
Sala EM0S2	6524	2795	-364
Sala EM0A1	9612	3344	-664
Sala de Estudo DEEM	849	800	-286
Sala de Mestrados	1705	2010	-275
Gabinete Presidência	1603	1840	-5
Sala M1S4	3941	4092	-555
M1-Sala de Professores	1761	2130	-970
Sala de Reuniões	2822	2311	-399
Sala EM1L3 CAD	8761	3150	-668
Sala EM1S3 Lab. Informática	10704	4051	-1124
Lab. Eletrónica e Potência	7780	3059	-289
Sala M1S8	4527	3163	-560
Gabinete 1	634	1112	-69
Gabinete 6	1415	1214	-129
Gabinete 13	680	1039	-70
Sala EM2S7	8012	3687	-572
Lab. Microprocessadores	7259	2778	-588
Sala EM2S5	3705	2135	-594
Lab. ROBOCORP	3724	1946	-437
Total	124551	69322	-12311

Figura 6.2-Cargas de arrefecimento e aquecimento com a substituição da iluminação.

Analisando os resultados obtidos, concluiu-se que a carga de arrefecimento total diminui em mais de 12kW, em relação às cargas de arrefecimento do modelo base, o que se pode considerar uma redução significativa. De realçar que a carga da iluminação não é considerada no cálculo das cargas de aquecimento e por isso não tem influência nos resultados de aquecimento.

6.1.1 Análise económica da melhoria proposta

Neste subcapítulo será realizada uma análise económica para a solução implementada, avaliando o custo de investimento e a poupança energética gerada. O objetivo é calcular o tempo de retorno do investimento (*Payback*), permitindo verificar a viabilidade financeira e sustentabilidade desta proposta de melhoria em termos de eficiência energética e redução de custos operacionais.

O valor do consumo de energia do sistema de iluminação pode ser calculado de acordo com a equação 6.

$$\text{Consumo de Energia (kWh)} = \frac{\text{Potência(W)} * \text{Número de horas (h)}}{1000} \quad (6)$$

Onde:

- Potência (W) é a potência total do sistema de iluminação.
- Tempo (horas) é o número total de horas de funcionamento.

Para realizar este cálculo, é necessário estimar o número de horas de funcionamento da iluminação nos compartimentos, uma vez que, durante o dia, a iluminação não necessita de estar 100% ligada e os espaços nem sempre estão ocupados. Na Figura 6.3, são apresentados o número estimado de horas de utilização de iluminação, por dia, e a potência de iluminação por compartimento para o sistema existente de lâmpadas fluorescentes e para o novo sistema em estudo, tecnologia de LED, permitindo uma comparação detalhada entre os dois sistemas.

	P.Flou [W]	P. LED [W]	Verão [h]	E.Led [kWh/dia]	E.Flou [kWh/dia]	Invern. [h]	E.Led [kWh/dia]	E.Flou [kWh/dia]
Sala M0A2	1972	816	4	3,26	7,89	6	4,90	11,83
Sala M0A1	696	288	2	0,58	1,39	3	0,86	2,09
Sala M0S1	696	288	1	0,29	0,70	1,5	0,43	1,04
Sala M0S3	1160	480	2	0,96	2,32	3	1,44	3,48
Sala de Estudo DEM	696	288	1	0,29	0,70	1,5	0,43	1,04
Sala EM0S2	1160	480	2	0,96	2,32	3	1,44	3,48
Sala EM0A1	1972	816	4	3,26	7,89	6	4,90	11,83
Sala de Estudo DEEM	464	192	1	0,19	0,46	1,5	0,29	0,70
Sala de Mestrados	464	192	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00
Gabinete Presidência	116	48	2	0,10	0,23	3	0,14	0,35
Sala M1S4	928	384	2	0,77	1,86	3	1,15	2,78
M1-Sala de Professores	696	288	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00
Sala de Reuniões	696	288	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00
Sala EM1L3 CAD	1044	432	2	0,86	2,09	3	1,30	3,13
Sala EM1S3 Lab. Informática	1740	720	3	2,16	5,22	4,5	3,24	7,83
Lab. Eletrónica e Potência	928	384	2	0,77	1,86	3	1,15	2,78
Sala M1S8	928	384	2	0,77	1,86	3	1,15	2,78
Gabinete 1	116	48	1	0,05	0,12	1,5	0,07	0,17
Gabinete 6	232	96	1	0,10	0,23	1,5	0,14	0,35
Gabinete 13	116	48	1	0,05	0,12	1,5	0,07	0,17
Sala EM2S7	928	384	1	0,38	0,93	1,5	0,58	1,39
Lab. Microprocessadores	928	384	2	0,77	1,86	3	1,15	2,78
Sala EM2S5	928	384	2	0,77	1,86	3	1,15	2,78
Lab. ROBOCORP	696	288	2	0,58	1,39	3	0,86	2,09
Total	21576	8928	50	18,42	44,52	75	27,63	66,77

Figura 6.3- Listagem do número de horas de utilização da iluminação no Edifício.

Para uma estimativa mais precisa, foi definido, com base no calendário escolar, o horário de inverno, considerando as pausas letivas e a época de exames, em que a utilização é pontual. O mesmo critério foi aplicado para o horário de verão, resultando em 114 dias de funcionamento no inverno e 77 dias no verão. Aplicando a Equação 6 aos valores obtidos, o consumo total de energia na instalação com lâmpadas fluorescentes é de 66,77kWh por dia no horário de inverno e 44,52 kWh

por dia no horário de verão. Já na instalação com lâmpadas LED, o consumo diário é de 27,63 kWh no inverno e 18,42 kWh no verão.

Pode-se concluir que a substituição das lâmpadas fluorescentes por LED resulta numa redução significativa do consumo de energia. Tanto no horário de inverno quanto no de verão, o consumo diário com lâmpadas LED é cerca de 58,6% inferior. Estas poupanças demonstram a eficácia energética das lâmpadas LED, tornando a sua implementação uma solução vantajosa em termos de economia de energia.

Para quantificar a poupança proporcionada pela implementação desta melhoria, é necessário determinar o custo da energia consumida associado a cada sistema de iluminação. Este cálculo segue a fórmula apresentada na equação 7.

$$\text{Custo de energia (€)} = \text{Consumo de Energia (kWh)} * \text{Preço do kWh (€)} \quad (7)$$

Onde:

- Consumo de Energia (kWh) é o valor total de energia consumida em kilowatt-hora.
- Preço do kWh (EUR) é o custo unitário por cada kilowatt-hora de eletricidade, geralmente fornecido pelo fornecedor de energia.

Os resultados dos custos indicam que para o sistema atual de lâmpadas fluorescentes, o custo total com a energia no horário de verão é de 540,69€, enquanto no horário de inverno atinge 1849,16€, resultando num custo anual total de 2389,85€. Para o sistema de lâmpadas LED equivalentes, o custo de energia no horário de verão é de 223,73€, e no horário de inverno é de 335,60€, totalizando 559,33€ anuais. Estes valores evidenciam a significativa redução nos custos energéticos proporcionada pela substituição das lâmpadas fluorescentes por LED.

O custo total da implementação desta medida é de 3400€, que inclui 2893,80€ referentes à compra das 362 lâmpadas LED (7,95€ por unidade), além do custo associado à mão de obra para a sua substituição. (LeoLeds e Habitissimo)

Para calcular o retorno financeiro (*payback*) desta melhoria, segue a fórmula da equação 8.

$$\text{Payback} = \frac{\text{Investimento Inicial}}{\text{Poupança Anual}} \quad (8)$$

Onde:

- Investimento Inicial (€): Refere-se ao custo total da implementação da melhoria, incluindo a substituição de equipamentos, instalação e outros custos associados.
- Poupança Anual (€): Representa a economia anual obtida com a melhoria, geralmente devido à redução do consumo energético ou outros benefícios.

A substituição das lâmpadas fluorescentes por LEDs proporciona uma poupança anual de 1830,52€. Este valor resulta da diferença entre o custo anual de energia consumida pelas lâmpadas fluorescentes (2389,85€) e o custo anual de energia consumidas pelas lâmpadas LED (559,33€).

Dado que o custo de instalação do sistema de lâmpadas LED é de 3400€, que inclui o material, o tempo de retorno do investimento (Payback) é de aproximadamente 1 ano e 10 meses. Isto significa que, em pouco menos de 2 anos, o investimento será totalmente recuperado através das poupanças energéticas obtidas, evidenciando a viabilidade económica da medida implementada.

Tendo por base os resultados positivos obtidos pela substituição da iluminação, no estudo das medidas de melhoria seguintes vai-se considerar que esta medida foi aplicada, usando-se de base as cargas de arrefecimento obtidas.

6.2 Melhoria da envolvente opaca exterior

A melhoria do isolamento térmico da envolvente é uma das estratégias mais eficazes para aumentar a eficiência energética dos edifícios, particularmente na redução das necessidades de aquecimento. Em Portugal, o Sistema de Isolamento Térmico pelo Exterior (ETICS), conhecido como Capoto, tem sido amplamente aplicado, tanto em construções novas como em reabilitações. Este sistema envolve a aplicação de placas de material isolante na parte exterior das paredes, protegendo o edifício contra variações térmicas, minimizando principalmente as perdas de calor no inverno e também ganhos excessivos de calor no verão (APFAC,2021).

No edifício em estudo, a envolvente opaca exterior, não contém qualquer tipo de isolamento. Uma vez que, na teoria, a aplicação de isolamento reduz consideravelmente as cargas de aquecimento de um edifício, decidiu-se aplicar ETICS, com uma camada de 7cm de EPS pelo exterior, como representado na Figura 6.4 (**Medida 2**). As características da parede exterior com a introdução do isolamento estão apresentadas na Tabela 6.1. A parede passou de um U de 0.76 W/m². K para um U de 0.34W/m². K.

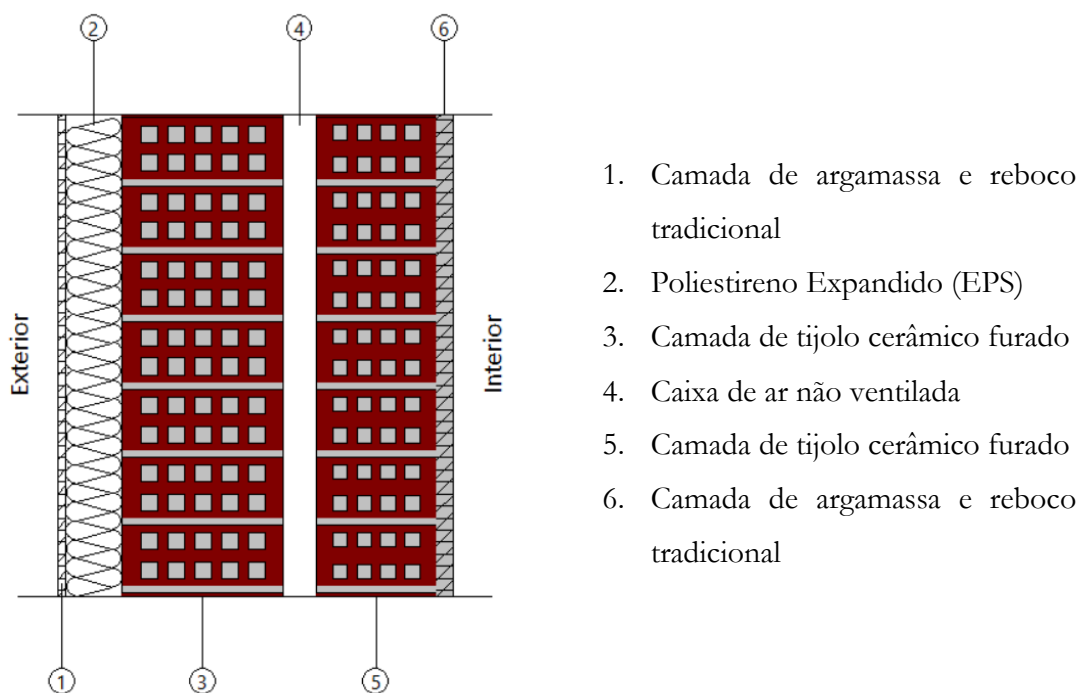


Figura 6.4- Esquema da parede exterior com aplicação de isolamento.

Tabela 6.1- Propriedades termofísicas da parede exterior com aplicação de isolamento.

Material	Espessura [cm]	Condutividade Térmica [W/m.K]	Resistência Térmica [m²K/W]	Massa volúmica [Kg/m³]	Calor específico [J/Kg.K]
Argamassa e reboco tradicional	2	1,3	0,015	2000	1000
EPS	7	0,032	2,188	35	1210
Tijolo cerâmico furado	20	0,385	0,519	875,5	1000
Caixa de ar não ventilada	4	-	-	-	-
Tijolo cerâmico furado	15	0,385	0,390	816,7	1000
Estuque tradicional	2	0,400	0,050	1000	1000
Coefficiente de transmissão térmico, U 0,34 W/m². K					

Na Figura 6.5 são apresentados os valores, em [W], das cargas de aquecimento e arrefecimento do edifício após a aplicação desta medida de melhoria. Estes valores são comparados com a versão anterior, onde foi implementada a melhoria na iluminação.

2-Isolamento e Iluminação [W]					
Compartimento	Arref.	Aque.	Arref. (2-1)	Aque. (2-1)	Split. 2
Sala M0A2	12089	2738	1233	-1085	12000
Sala M0A1	5962	1443	598	-866	6000
Sala M0S1	5382	1645	471	-741	5500
Sala M0S3	7240	2263	605	-828	7500
Sala de Estudo DEM	2468	1239	219	-552	2500
Sala EM0S2	6884	1990	360	-805	7000
Sala EM0A1	10321	2317	709	-1027	10500
Sala de Estudo DEEM	1135	296	287	-503	1500
Sala de Mestrados	2003	1383	299	-627	2000
Gabinete Presidência	1508	1188	-95	-652	1500
Sala M1S4	4579	2784	638	-1308	4500
M1-Sala de Professores	2179	1502	418	-627	2500
Sala de Reuniões	3223	1811	401	-499	3500
Sala EM1L3 CAD	9271	1890	511	-1260	9500
Sala EM1S3 Lab. Informática	11695	2961	990	-1090	12000
Lab. Eletrónica e Potência	8100	2218	320	-842	8500
Sala M1S8	4961	2643	434	-520	5000
Gabinete 1	655	700	21	-412	1000
Gabinete 6	1535	880	120	-334	1500
Gabinete 13	743	864	64	-175	1000
Sala EM2S7	8609	2899	597	-788	9000
Lab. Microprocessadores	7809	2386	549	-391	8000
Sala EM2S5	4269	2041	564	-94	4500
Lab. ROBOCORP	4115	1510	391	-436	4500
Total	136031	50712	11480	-18610	

Figura 6.5- Listagem das cargas térmicas do Edifício com aplicação de Isolamento e Iluminação.

As cargas de aquecimento foram reduzidas em 18610 W, uma vez que o isolamento térmico reduziu as perdas de calor através da envolvente do edifício durante o inverno, permitindo que o calor gerado no interior fosse mantido por mais tempo, o que diminuiu a necessidade de aquecimento. Por outro lado, as cargas de arrefecimento aumentaram em 11480W, porque, o mesmo isolamento também dificultou a dissipação do calor acumulado no verão, especialmente em espaços com alta exposição solar, elevada utilização de equipamentos e grande ocupação aumentando a necessidade de arrefecimento para manter o conforto térmico. Os maiores aumentos das cargas de arrefecimento foram verificados precisamente nos compartimentos onde as três situações anteriores se verificam.

Na Figura 6.5, é também representado o valor da maior carga térmica, arredondada, que será utilizado como referência para a seleção adequada das unidades de climatização em cada compartimento do edifício, posteriormente. Este valor, obtido após a aplicação das melhorias, permite garantir que as unidades de climatização sejam dimensionadas para responder às necessidades térmicas de cada espaço. Ao definir este valor como termo de comparação, é possível avaliar o impacto de cada medida de melhoria implementada nas cargas térmicas do edifício.

Relativamente às necessidades de energia e o seu respetivo consumo, pode-se concluir que aplicar esta medida de melhoria traz muitos benefícios, pois reduz em 30,2% as necessidades totais de energia útil, em relação à base, como se confirma pelos valores apresentados na Figura 6.6. Como já referido anteriormente, o consumo de energia elétrica associado à climatização foi determinado com o SCOP e SEER de referência da legislação, que é de 3.

Modelo/Versão	Base	Envol. + Ilum.	Unidades
Ni Aquecimento	58,19	37,13	kWh/m ² .ano
Nv Arrefecimento	4,53	6,65	kWh/m ² .ano
Total	62,72	43,78	kWh/m ² .ano
Nec. E.Ele.	20,91	14,59	kWh/m ²
Nec. E.Ele. Edifício	36733,01	25640,49	kWh

Figura 6.6 - Necessidades energéticas do Edifício após Medidas 1 e 2.

Tendo em conta os valores obtidos, apesar do aumento nas cargas de arrefecimento, as reduções nas cargas de aquecimento mostram-se mais relevantes, uma vez que o maior consumo energético do edifício ocorre durante a estação de aquecimento, como se pode verificar pelas necessidades de energia úteis para aquecimento.

6.2.1 Análise económica da proposta de melhoria

Para analisar a viabilidade económica desta medida de melhoria, é necessário apurar o custo da sua aplicação e a poupança anual que proporciona com a redução de consumo de eletricidade.

Para calcular o custo da aplicação de ETICS, é necessário apurar qual a área total da envolvente opaca exterior. Este valor é retirado do *software*, que é 926m². O custo para aplicação de capoto é dada por metro quadrado de área. Tendo por base um valor indicativo de 40€/m², com base num orçamento dado pela empresa “Obras em Casa”. Para o Edifício, estimou-se um custo total de 37040€.

Para se quantificar o consumo de energia elétrica necessária para a climatização dos espaços úteis, utiliza-se a equação 9.

$$E. \text{ Elétrica Necessária (kWh) } = \frac{Nec.de \text{ Energia Util(kWh)}}{Eficiência \text{ Energética (SCOP SEER)}} \quad (9)$$

Onde:

- Necessidades de Energia Útil (kWh): É a quantidade de energia que o edifício precisa para aquecer ou arrefecer o ambiente.
- Eficiência do Equipamento (SCOP ou SEER): SCOP para aquecimento e SEER para arrefecimento, representam a eficiência sazonal dos equipamentos de climatização. Um valor mais elevado indica maior eficiência energética.

Sabe-se que no modelo base, o valor total das necessidades de energia para climatização (denominado "Nec. E.E. Edifício" na Figura 5.1 do subcapítulo 5.1) é

de 36733,01 kWh, o que resulta num custo anual de eletricidade aproximado de 8923€ para satisfazer essas necessidades. Aplicando a mesma metodologia após a implementação da medida de melhoria, o valor total das necessidades de energia elétrica para climatização do edifício é reduzido para aproximadamente 25640 kWh, resultando num custo anual de 6229€. Esta diferença traduz-se numa poupança de 2694€ anuais. Aplicando a Equação 8 para o cálculo do *payback*, conclui-se que o retorno do investimento inicial será atingido em 13 anos e 8 meses.

Embora o tempo de retorno do investimento seja relativamente longo, a medida proporciona benefícios significativos a longo prazo, tanto em termos de eficiência energética como na redução de custos operacionais, tornando-se uma solução viável e financeiramente vantajosa tendo em consideração a vida útil do isolamento, que, de acordo com as normas, é de 30 anos (ETICS Association, n.d.).

6.3 Climatização passiva

As variáveis que mais influenciam a transferência de calor a nível da envolvente dos edifícios são a temperatura do ar exterior e a radiação solar. A temperatura do ar determina o estabelecimento de fluxos energéticos do interior para o exterior, fluxos estes que ocorrem fundamentalmente no período de inverno, tratando-se neste caso de perdas térmicas, enquanto, no verão o sentido do fluxo tem tendência a inverter.

A radiação solar tem um papel fundamental no conforto térmico em qualquer edifício, sendo que no inverno constitui uma fonte de calor, contribuindo para o aumento da temperatura interior, enquanto no verão é uma fonte de calor a evitar (Pereira, S., 2013). A área, o tipo e a orientação dos envidraçados de um edifício tem uma grande influência nos ganhos térmicos por radiação num edifício, sendo por isso um dos elementos-chave onde se deve atuar no sentido de maximizar os ganhos solares no inverno, mas minimizá-los no verão. Nesse sentido são apresentadas e analisadas duas medidas, o sombreamento a partir de palas e a substituição dos vidros por vidros de baixa emissividade térmica. Optou-se por estudar estas duas medidas visto que a solução existente já é bastante aceitável por serem janelas com caixilharia de PVC, com vidro duplo com 10cm de caixa de ar e por já existirem estores de sombreamento interiores.

6.3.1 Sombreamento

O sombreamento é uma técnica de climatização passiva e de controlo solar que visa reduzir a quantidade de radiação direta que atinge as superfícies envidraçadas de um edifício, minimizando os ganhos de calor durante os meses mais quentes. Ao bloquear ou filtrar a incidência de luz solar direta, o sombreamento ajuda a manter os interiores mais frescos, reduzindo a necessidade de arrefecimento e melhorando o conforto térmico. Esta solução pode ser implementada através de elementos arquitetónicos, como palas solares, toldos, persianas ou estores. Além de ser uma medida eficaz de eficiência energética, o sombreamento contribui para prolongar a

vida útil dos materiais do edifício, protegendo-os da exposição solar intensa (ADENE, 2020).

Uma vez que se observou um esperado aumento das cargas de arrefecimento com a aplicação do ETICS, a próxima medida visa baixar essas cargas com a aplicação de sistemas de sombreamento, principalmente nos vãos envidraçados orientados para sul. O *software* CYPE, na versão estudante, apenas dispõe da opção da aplicação externa de palas de sombreamento e da aplicação interna de estores, sendo que estes últimos já se encontram aplicados no edifício e considerados no modelo, como já foi referido anteriormente. O sistema externo de palas solares foi o selecionado para efetuar o estudo.

Para tal, efetuou-se o dimensionamento das palas de sombreamento de acordo com a Figura 6.7.

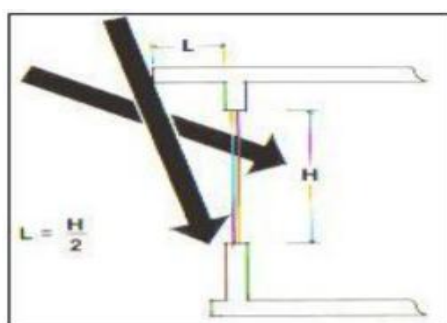


Figura 6.7- Esquema de dimensionamento para palas de sombreamento (Williams College, n.d.).

Dado que as janelas dos compartimentos climatizados possuem uma altura (H) de 1,20 m, o comprimento (L) das palas de sombreamento horizontais foi calculado como sendo 0,60 m. Este valor segue a regra de proporção de 50% da altura da janela, representado acima, garantindo um sombreamento adequado e equilibrado para otimizar o desempenho térmico dos compartimentos.

Após a implementação desta solução de climatização passiva no modelo do edifício obtiveram-se os valores de cargas térmicas apresentados na, foram levantados os resultados descritos na Figura 6.8. Os resultados apresentados a verde correspondem à aplicação de palas de sombreamento em todos os vãos envidraçados dos compartimentos (**Medida 3**). A segunda parte da tabela, com os resultados apresentados a cinza, referem-se à aplicação de palas de sombreamento apenas nos compartimentos onde se verificou uma redução considerável nas cargas térmicas com a implementação desta solução (**Medida 4**).

Compartimento	3 - Sombreamento Total [W]					4- Sombreamento Parcial [W]				
	Arref.	Aque.	Arref. (3-2)	Split.3	Dif. Sp. (3-2)	Arref.	Aque.	Arref. (4-3)	Split.4	Dif. Sp. (4-3)
Sala M0A2	10937	2738	-1152	11000	-1000	10937	2738	0	11000,0	0,0
Sala M0A1	5047	1438	-915	5000	-1000	5752	1438	705	6000,0	1000,0
Sala M0S1	4766	1645	-616	5000	-500	4766	1645	0	5000,0	0,0
Sala M0S3	6661	2263	-580	7000	-500	6661	2263	0	7000,0	0,0
Sala de Estudo DEM	2468	1239	0	2500	0	2468	1239	0	2500,0	0,0
Sala EM0S2	6039	1986	-846	6000	-1000	6039	1986	0	6000,0	0,0
Sala EM0A1	10221	2317	-100	10500	0	10321	2317	100	10500,0	0,0
Sala de Estudo DEEM	1135	296	0	1500	0	1135	296	0	1500,0	0,0
Sala de Mestrados	2003	1383	0	2000	0	2003	1383	0	2000,0	0,0
Gabinete Presidência	1508	1188	0	1500	0	1508	1188	0	1500,0	0,0
Sala M1S4	4572	2784	-6	4500	0	4579	2784	6	4500,0	0,0
M1-Sala de Professores	2179	1502	0	2500	0	2179	1502	0	2500,0	0,0
Sala de Reuniões	3223	1811	0	3500	0	3223	1811	0	3500,0	0,0
Sala EM1L3 CAD	8731	1885	-541	9000	-500	8731	1885	0	9000,0	0,0
Sala EM1S3 Lab. Informática	11301	2961	-394	11500	-500	11674	2961	373	11500,0	0,0
Lab. Eletrónica e Potência	6693	2218	-1407	7000	-1500	6693	2218	0	7000,0	0,0
Sala M1S8	4942	2641	-19	5000	0	4957	2641	14	5000,0	0,0
Gabinete 1	655	700	0	1000	0	655	700	0	1000,0	0,0
Gabinete 6	1535	880	0	1500	0	1535	880	0	1500,0	0,0
Gabinete 13	743	864	0	1000	0	743	864	0	1000,0	0,0
Sala EM2S7	7385	2899	-1224	7500	-1500	7385	2899	0	7500,0	0,0
Lab. Microprocessadores	6849	2386	-960	7000	-1000	6849	2386	0	7000,0	0,0
Sala EM2S5	4266	2041	-3	4500	0	4269	2041	3	4500,0	0,0
Lab. ROBOCORP	4072	1510	-42	4000	-500	4115	1510	42	4500,0	500,0
Total	127226	50697	-8805			128470	50697	1244		

Figura 6.8 - Cargas Térmicas do Edifício após a aplicação de palas de sombreamento.

Realizaram-se estes dois estudos devido ao elevado custo desta solução, sendo necessário clarificar os impactes de só aplicar palas de sombreamento nas zonas onde estas demonstram resultados significativos. O objetivo é reduzir o investimento inicial sem comprometer a eficácia da aplicação desta medida, garantindo que o sistema seja aplicado apenas nos compartimentos onde apresenta maiores benefícios.

Analisando os resultados (valores a verde) da aplicação das palas de sombreamento em todas as janelas de espaços de aulas, notou-se uma redução significativa nas cargas de arrefecimento nos compartimentos M0A1, M0A2, EM0S2, LAB Eletrónica e Potência, EM2S7 e o Laboratório de Microprocessadores. Assim, para o segundo estudo mencionado, apenas estes compartimentos tem aplicados esta medida de melhoria. com o objetivo de analisar qual a influência nos compartimentos adjacentes de não instalar palas.

Como resultado, apenas foi observada uma alteração significativa no compartimento M0A1, o que pode ser explicado pela remoção do sombreamento do compartimento M1S4, situado no piso superior. Durante o verão, nas horas de "meio-dia", o compartimento M1S4 sombreia a envolvente do compartimento M0A1, como ilustrado na Figura 6.9.



Figura 6.9- Efeito do sombreamento das palas solares no edifício.

Na Figura 6.10, podem observar-se os valores para as necessidades energéticas do edifício para cada uma das situações descritas.

Modelo/Versão	Envol. + Ilum.	Sombr. Total	Sombr. Parcial	Unidades
Ni Aquecimento	37,13	42,16	40,58	kWh/m ² .ano
Nv Arrefecimento	6,65	4,74	5,62	kWh/m ² .ano
Total	43,78	46,90	46,2	kWh/m ² .ano
Nec. E.Ele.	14,59	15,63	15,4	kWh/m ²
Nec. E.Ele. Edifício	25640,49	27467,77	27057,8	kWh

Figura 6.10- Necessidades energéticas do edifício após implementação das Medidas 3 e 4.

Com base nos resultados, conclui-se que, embora a aplicação do sistema de sombreamento reduza as cargas de arrefecimento, o consumo energético global do edifício piora. Isto ocorre devido ao aumento das necessidades energéticas de aquecimento, que superam a redução nas necessidades de arrefecimento que se obtém com aplicação das palas de sombreamento. Ou seja, o ganho obtido na diminuição das cargas de arrefecimento não é suficiente para compensar o acréscimo nas exigências de aquecimento, resultando num balanço energético desfavorável para o edifício, não sendo por isso necessário fazer a análise da viabilidade económica.

6.3.2 Vãos envidraçados

As características dos envidraçados influenciam tanto a condução térmica, a proteção solar, a ventilação natural e a iluminação natural dos edifícios. Estes são pontos cruciais tanto para o desempenho energético dos edifícios como para o conforto térmico dos mesmos. No período de verão, o objetivo passa por reduzir os ganhos térmicos, para assim evitar o sobreaquecimento no interior do edifício. Em contrapartida, no período de inverno importa favorecer o aquecimento solar e evitar as perdas de calor através dos vidros e caixilharias. (Caldeira,2016).

Além de avaliar o impacto da implementação das palas de sombreamento, torna-se igualmente relevante estudar o efeito da aplicação de vidros de baixa emissividade térmica, dado que o edifício já possui caixilharias de boa qualidade em PVC. Esta análise permitirá verificar se a combinação de caixilharias eficientes com vidros de baixa emissividade aliados ao sombreamento aplicado, pode oferecer uma solução mais equilibrada e eficaz na redução das cargas térmicas, sem os efeitos negativos no consumo energético que foram observados com o uso exclusivo de sombreamento.

À semelhança da medida anterior, foram realizados dois estudos: no primeiro, foram implementados vidros de baixa emissividade em todo o edifício (Medida 5); no segundo, esta solução foi aplicada apenas nos compartimentos onde, no primeiro estudo desta medida, se observou um impacto positivo significativo, mantendo-se o vidro standard nas restantes zonas (medida 6). Em ambos os casos, foi considerada a aplicação parcial de palas de sombreamento. Desta forma podemos comparar os impactos em ambas as situações pois esta medida de melhoria também é dispendiosa.

Na Figura 6.11 são apresentados os resultados referentes à implementação desta melhoria, os quais serão comparados com a solução que considera o sombreamento parcial da melhoria estudada anteriormente, com o objetivo de avaliar o impacto decorrente desta alteração.

5- Vidros Baixa Emissividade Total [W]					
Compartimento	Arref.	Aque.	Arref. (5-4)	Split	Dif.Sp. (5-4)
Sala M0A2	10472	2565	-465	10500	-500
Sala M0A1	4980	1309	-772	5000	-1000
Sala M0S1	4469	1515	-297	4500	-500
Sala M0S3	6447	2051	-214	6500	-500
Sala de Estudo DEM	1866	1131	-602	2000	-500
Sala EM0S2	5865	1814	-174	6000	0
Sala EM0A1	10051	2145	-270	10000	-500
Sala de Estudo DEEM	1135	296	0	1500	0
Sala de Mestrados	1875	1265	-129	2000	0
Gabinete Presidência	830	1037	-677	1000	-500
Sala M1S4	4471	2612	-108	4500	0
M1-Sala de Professores	1788	1416	-392	2000	-500
Sala de Reuniões	3014	1694	-209	3000	-500
Sala EM1L3 CAD	8489	1720	-242	8500	-500
Sala EM1S3 Lab. Informática	11167	2690	-507	11500	0
Lab. Eletrónica e Potência	6154	2003	-539	6500	-500
Sala M1S8	4792	2450	-165	5000	0
Gabinete 1	618	658	-36	1000	0
Gabinete 6	1295	837	-239	1500	0
Gabinete 13	670	782	-73	1000	0
Sala EM2S7	6910	2705	-476	7000	-500
Lab. Microprocessadores	6716	2236	-133	7000	0
Sala EM2S5	4155	1898	-114	4500	0
Lab. ROBOCORP	3987	1408	-128	4000	-500
Total	119825	46874	-8646		

Figura 6.11- Cargas térmicas após a aplicação de vidros térmicos em todo o edifício.

A análise dos resultados revela uma redução nas potências de arrefecimento, permitindo uma diminuição da potência necessária das unidades de climatização em 13 compartimentos.

Concluída a análise da aplicação de vidros de baixa emissividade em todos os vãos envidraçados, procede-se à análise da solução alternativa, em que essa melhoria é removida nos compartimentos onde os resultados não demonstraram um impacto significativo (Medida 6), como já referido anteriormente. Na Figura 6.12 são apresentados os resultados obtidos nesta condição, em [W], comparando-os com a medida anterior.

	6- Vidros Baixa Emissividade Parcial [W]				
Compartimento	Arref.	Aque.	Arref. (6-5)	Split	Dif.Sp. (6-5)
Sala M0A2	10785	2613	314	11000	500
Sala M0A1	5752	1438	772	6000	1000
Sala M0S1	4635	1583	165	5000	500
Sala M0S3	6521	2109	74	6500	0
Sala de Estudo DEM	2468	1239	602	2500	500
Sala EM0S2	6039	1986	174	6000	0
Sala EM0A1	10114	2202	63	10500	500
Sala de Estudo DEEM	1135	296	0	1500	0
Sala de Mestrados	2003	1383	129	2000	0
Gabinete Presidência	1508	1188	677	1500	500
Sala M1S4	4579	2784	108	4500	0
M1-Sala de Professores	2179	1502	392	2500	500
Sala de Reuniões	3223	1811	209	3500	500
Sala EM1L3 CAD	8635	1765	146	9000	500
Sala EM1S3 Lab. Informática	11327	2764	160	11500	0
Lab. Eletrónica e Potência	6548	2062	394	6500	0
Sala M1S8	4957	2641	165	5000	0
Gabinete 1	655	700	36	1000	0
Gabinete 6	1535	880	239	1500	0
Gabinete 13	743	864	73	1000	0
Sala EM2S7	7234	2758	324	7500	500
Lab. Microprocessadores	6849	2386	133	7000	0
Sala EM2S5	4269	2041	114	4500	0
Lab. ROBOCORP	4017	1436	30	4000	0
Total	127003	49553	7178		

Figura 6.12- Cargas térmicas após aplicação da Medida 6.

Com base nos resultados obtidos, pode-se concluir que a remoção dos vidros de baixa emissividade nos compartimentos onde se verificou um impacto reduzido afeta, de forma indireta, os compartimentos onde essa melhoria foi mantida. Isto ocorre, pois, ocorrem trocas térmicas entre os diferentes compartimentos, que aumentam a carga térmica nas zonas com vidros de baixa emissividade, reduzindo a sua eficácia no controlo das temperaturas interiores.

Para concluir a análise desta proposta de melhoria e assim ter uma comparação completa, foi realizado um terceiro estudo. Este estudo considerou a aplicação de isolamento térmico pelo exterior (ETICS) na envolvente opaca, em conjunto com a instalação de vidros de baixa emissividade em todo o edifício (**Medida 7**), uma vez que a aplicação parcial dos vidros mostrou ter um impacto negativo nos resultados. Esta solução foi comparada com outras abordagens: a aplicação parcial de sombreamento e vidros de baixa emissividade (**Medida 5**), a aplicação de sombreamento parcial no edifício (**Medida 4**), e a solução que contempla apenas o isolamento da envolvente e Iluminação (**Medida 2**).

Os resultados deste estudo estão representados na Figura 6.13, em [W].

Compartimento	7- Vidros de Baixa Emissividade [W]					
	Arref.	Aque.	Split	Dif.Sp. (7-5)	Dif.Sp. (7-4)	Dif.Sp. (7-2)
Sala M0A2	11063	2565	11000	0	0	-1000
Sala M0A1	5115	1311	5500	-500	-500	-500
Sala M0S1	4803	1515	5000	0	0	-500
Sala M0S3	6503	2051	6500	0	-500	-1000
Sala de Estudo DEM	1866	1131	2000	-500	-500	-500
Sala EM0S2	5876	1816	6000	0	0	-1000
Sala EM0A1	10051	2145	10000	-500	-500	-500
Sala de Estudo DEEM	1135	296	1500	0	0	0
Sala de Mestrados	1875	1265	2000	0	0	0
Gabinete Presidência	830	1037	1000	-500	-500	-500
Sala M1S4	4471	2612	4500	0	0	0
M1-Sala de Professores	1788	1416	2000	-500	-500	-500
Sala de Reuniões	3014	1694	3000	-500	-500	-500
Sala EM1L3 CAD	8777	1722	9000	0	0	-500
Sala EM1S3 Lab. Informática	11188	2690	11500	0	0	-500
Lab. Eletrónica e Potência	6909	2003	7000	500	0	-1500
Sala M1S8	4794	2451	5000	0	0	0
Gabinete 1	618	658	1000	0	0	0
Gabinete 6	1295	837	1500	0	0	0
Gabinete 13	670	782	1000	0	0	0
Sala EM2S7	7527	2705	7500	0	0	-1500
Lab. Microprocessadores	6975	2236	7000	0	0	-1000
Sala EM2S5	4155	1898	4500	0	0	0
Lab. ROBOCORP	3987	1408	4000	0	-500	-500
Total	122896	46880		-3000	-4500	-12500

Figura 6.13- Cargas térmicas com aplicação de vidros térmicos em todo o edifício.

Com base nestes resultados, conclui-se que a aplicação exclusiva de vidros de baixa emissividade (**Medida 7**) é, por si só, uma solução mais eficaz do que qualquer alternativa que inclua sombreamento (**Medidas 3 e 4**). Esta conclusão pode ser justificada pela limitada redução do fator solar, dado que, conforme mencionado anteriormente, os estores interiores já existentes foram incluídos no modelo do edifício. De forma resumida, os vidros de baixa emissividade também apresentam um desempenho térmico superior, ao reduzir as perdas de calor no inverno e minimizar os ganhos no verão, independentemente das condições externas. Em contraste, as palas de sombreamento, embora eficazes na redução da radiação solar direta, não mantêm o nível de eficiência ao longo do ano, especialmente em dias com céu nublado ou radiação solar difusa, o que limita o seu impacto. Assim, os vidros de baixa emissividade demonstram ser uma solução mais consistente e eficiente no controlo das cargas térmicas ao longo das estações.

Ao comparar a medida de melhoria da aplicação de vidros de baixa emissividade (Medida 7) com a aplicação de ETICS (considera a aplicação da Iluminação Led) (Medidas 1 + 2) na envolvente opaca, observa-se que a implementação destes vidros resulta em reduções significativas nas cargas de arrefecimento, atingindo o objetivo que proporciona o dimensionamento de unidades interiores de menor potência. Esta eficácia deve-se, em grande parte, à redução do coeficiente de transmissão térmica (valor U) nos vãos envidraçados, que diminui de 2,9 W/m²K para 1,4 W/m²K, graças à presença de gás árgon na câmara dos vidros duplos.

Analisado o impacto das soluções descritas nas cargas térmicas, deve ser avaliado também o impacto nas necessidades energéticas. Na Figura 6.14 estão representados esses valores.

Modelo/Versão	Env. +lumin.	S.P.V.T	S.P.V.P	Só Vid.	Unidades
Ni Aquecimento	37,13	45,47	41,84	43,72	kWh/m ² .ano
Nv Arrefecimento	6,65	2,43	4,70	3,00	kWh/m ² .ano
Total	43,78	47,90	46,54	46,72	kWh/m ² .ano
Nec. E.Ele.	14,59	15,97	15,51	15,57	kWh/m ²
Nec. E.Ele. Edifício	25640,49	28053,43	27256,93	27362,35	kWh

Figura 6.14- Necessidades energéticas para as Melhorias 2, 5, 6 e 7.

Mais uma vez se verifica que nenhuma das soluções propostas para este elemento apresenta resultados globais superiores à melhoria da envolvente opaca com isolamento ETICS que inclui a melhoria da Iluminação. Embora se verifiquem melhorias durante a estação de arrefecimento, estas são insuficientes para compensar o impacto negativo observado nas necessidades energéticas durante a estação de aquecimento. A diferença significativa nas cargas de aquecimento torna a melhoria da envolvente a solução mais equilibrada e eficiente para o controlo das necessidades energéticas anuais do edifício onde o objetivo é reduzir os consumos de energia.

As reduções nas cargas de arrefecimento, que poderiam levar a uma diminuição na potência das unidades de climatização, não justificam o elevado investimento de 22400€ para a implementação das palas de sombreamento ou de 24600€ para a instalação de vidros térmicos, como mostra a Figura 6.15. A diferença de custo entre duas unidades de climatização com uma diferença de 1 kW de potência é cerca de 500€. (Mitsubishi) Mesmo considerando a redução de carga obtida nos 16 compartimentos, a poupança total na aquisição de equipamentos de climatização seria de aproximadamente 6000€, valor que está muito aquém do investimento inicial requerido por qualquer uma das soluções. Além disso, ambas as medidas aumentam o consumo energético durante a estação de aquecimento, tornando o investimento ainda menos atrativo.

	€	Qt.	Total
Palas (Estrusal Aluminios) *	350	64	22400
Vidros térmicos (Grupo SoSoares) *	150	164	24600
Split (Tecniclíma, ambitemp) 100€ dif 0.5kW	500	16	8000

Figura 6.15 - Custo da implementação de melhorias.

(*Valores de custo sem mão de obra associada.)

Em suma, com base nos resultados obtidos e tendo em vista objetivo principal que é a redução do consumo de energia do edifício, a nível das medidas estudadas aplicadas à envolvente, recomenda-se somente a aplicação do isolamento.

6.4 Climatização ativa

Nesta secção, será feita a comparação da aplicação de dois sistemas de climatização ativa amplamente utilizados em edifícios de serviços: o sistema Split e o sistema VRF (*Variable Refrigerant Flow*). Ambos os sistemas são reconhecidos pela sua capacidade de regular o conforto térmico, mas apresentam diferenças significativas em termos de funcionamento, eficiência energética e aplicabilidade em diferentes tipos de espaços. O sistema Split, caracterizado por unidades individuais, é amplamente utilizado em compartimentos de menor dimensão, enquanto o sistema VRF, mais avançado, permite um controlo preciso e flexível de múltiplas zonas através de um único sistema centralizado.

O objetivo deste estudo é avaliar o desempenho de cada sistema, tanto em termos de eficiência energética como de viabilidade técnica e económica, de forma a determinar qual a solução mais adequada para diferentes cenários de utilização em edifícios.

Com base nos estudos anteriores, concluiu-se que, embora a melhoria da envolvente com ETICS não apresente as cargas de arrefecimento mais baixas quando comparada com outras soluções de climatização passiva, é a opção mais eficiente de forma global. Desta forma, os resultados obtidos para as cargas de dimensionamento e para as necessidades de energia útil para climatização, da melhoria da envolvente com ETICS, (Medida 2), que já inclui a substituição da iluminação (Medida 1), serve de referência para o dimensionamento dos sistemas de climatização ativa e o seu estudo económico.

6.4.1 Split e Multi-Split

Para iniciar o dimensionamento, serão consideradas as cargas de arrefecimento, em [W], de acordo com os valores apresentados na Figura 6.16, referentes à medida de melhoria da envolvente que inclui a substituição da iluminação. As cargas de arrefecimento, visto que são superiores às cargas de aquecimento, vão ser a base para a escolha do sistema de climatização reversível de forma a serem garantidas as

condições de conforto térmico dos espaços climatizados do edifício (20°C no inverno e 25°C no verão). De referir que as cargas de arrefecimento obtidas foram arredondadas para as potências mais próximas dos equipamentos disponíveis no mercado.

Compartimento	Potência Unidades Split [W]
Sala M0A2	12000
Sala M0A1	6000
Sala M0S1	5500
Sala M0S3	7500
Sala de Estudo DEM	2500
Sala EM0S2	7000
Sala EM0A1	10500
Sala de Estudo DEEM	1500
Sala de Mestrados	2000
Gabinete Presidência	1500
Sala M1S4	4500
M1-Sala de Professores	2500
Sala de Reuniões	3500
Sala EM1L3 CAD	9500
Sala EM1S3 Lab. Informática	12000
Lab. Eletrónica e Potência	8500
Sala M1S8	5000
Gabinete 1	1000
Gabinete 6	1500
Gabinete 13	1000
Sala EM2S7	9000
Lab. Microprocessadores	8000
Sala EM2S5	4500
Lab. ROBOCORP	4500

Figura 6.16- Cargas térmicas do Edifício com melhoria do isolamento e iluminação.

O dimensionamento dos sistemas de climatização do tipo *Split*, será baseado nos catálogos da Mitsubishi, que fornecem especificações técnicas detalhadas e preços das unidades disponíveis (Mitsubishi, 2024). A Mitsubishi é uma marca reconhecida no mercado e tem como vantagem disponibilizar catálogos com acesso às informações necessárias ao dimensionamento dos equipamentos e tem preços disponíveis o que permite determinar a relação custo-benefício das soluções propostas. Para efeitos de cálculo da energia elétrica consumida pelas unidades *split* vai-se considerar os mesmos valores de eficiência em todos os modelos selecionados, ou seja, vai-se considerar um SCOP de 4,4 no modo de aquecimento e um SEER de 6,5 no modo de arrefecimento. Estas eficiências correspondem aos valores apresentados no catálogo da Mitsubishi (Mitsubishi, 2024), conforme se apresenta na ficha técnica do equipamento apresentado na Figura 6.17.

Indoor unit		SRR50ZS-W	SRR60ZS-W	FDTC25VH1	FDTC35VH1	FDTC40VH	FDTC50VH
Outdoor unit		SRC50ZSX-W3	SRC60ZSX-W3	SRC25ZS-W2	SRC35ZS-W2	SRC40ZSX-W1	SRC50ZSX-W2, W3
Energy class (cooling/heating)		A++/A+	A++/A+	A++/A+	A++/A++	A++/A+	A++/A+
SEER		6.50	6.20	6.80	7.10	6.94	6.52
SCOP (Average climate)		4.40	4.30	4.00	4.60	4.37	4.30
Pdesign (cooling/heating(@-10°C))	kW	5.00/4.50	5.60/5.20	2.50/2.40	3.50/2.90	4.0/4.0	5.0/4.3
Annual electricity consumption (cooling/heating)	kWh/a	270/1431	316/1692	129/840	173/883	202/1283	269/1401
Designated heating season		Average					

Figura 6.17- Dados técnicos do sistema *Split* (Mitsubishi,2024).

Como referido anteriormente partindo das cargas térmicas determinadas previamente, procede-se à seleção das unidades interiores que respondam a essas exigências. Aquando da seleção das unidades deve-se considerar a potência necessária para climatizar adequadamente os espaços, mas também a sua disposição dentro dos compartimentos, de modo a evitar zonas de desconforto térmico.

Na Figura 6.18 são apresentados os modelos dos equipamentos selecionados e a quantidade de unidades necessárias por compartimento, assim como a sua potência de referência e as suas potências nominais para aquecimento e arrefecimento.

Compartimento	Carga	Modelo	Potência	Cap.Arref	Cap. Aq.	Unidades
Sala M0A2	12000	SRK60ZSX	6kW	6,1kW	6,8W	2
Sala M0A1	6000	SRK35ZSX	3,5kW	3,5kW	4,3kW	2
Sala M0S1	5500	SRK35ZSX	3,5kW	3,5kW	4,3kW	2
Sala M0S3	7500	SRK25ZSX	2,5kW	2,5kW	3,2kW	3
Sala de Estudo DEM	2500	SRK25ZSX	2,5kW	2,5kW	3,2kW	1
Sala EM0S2	7000	SRK35ZSX	3,5kW	3,5kW	4,3kW	2
Sala EM0A1	10500	SRK60ZSX	6kW	6,1kW	6,8W	2
Sala de Estudo DEEM	1500	SRK15ZTW	1,5KW	1,5kW	1,8kW	1
Sala de Mestrados	2000	SRK25ZSX	2,5kW	2,5kW	3,2kW	2
Gabinete Presidência	1500	SRK15ZTW	1,5KW	1,5kW	1,8kW	1
Sala M1S4	4500	SRK25ZSX	2,5kW	2,5kW	3,2kW	2
M1-Sala de Professores	2500	SRK25ZSX	2,5kW	2,5kW	3,2kW	1
Sala de Reuniões	3500	SRK50ZSX	5kW	5kW	6kW	1
Sala EM1L3 CAD	9500	SRK50ZSX	5kW	5kW	6kW	2
Sala EM1S3 Lab. Informá	12000	SRK60ZSX	6kW	6,1kW	6,8W	2
Lab. Eletrónica e Potênci	8500	SRK50ZSX	5kW	5kW	6kW	2
Sala M1S8	5000	SRK50ZSX	5kW	5kW	6kW	1
Gabinete 1	1000	SRK15ZTW	1,5KW	1,5kW	1,8kW	1
Gabinete 6	1500	SRK15ZTW	1,5KW	1,5kW	1,8kW	1
Gabinete 13	1000	SRK15ZTW	1,5KW	1,5kW	1,8kW	1
Sala EM2S7	9000	SRK50ZSX	5kW	5kW	6kW	2
Lab. Microprocessadores	8000	SRK50ZSX	5kW	5kW	6kW	2
Sala EM2S5	4500	SRK25ZSX	2,5kW	2,5kW	3,2kW	2
Lab. ROBOCORP	4500	SRK25ZSX	2,5kW	2,5kW	3,2kW	2
					Total	50

Figura 6.18- Unidades Interiores do tipo *Split* selecionadas para climatização do Edifício.

Embora para alguns compartimentos se pudesse optar por uma única unidade, visto que existem unidades disponíveis no mercado com a potência necessária, optou-se por instalar duas unidades nesses espaços. A utilização de duas unidades proporciona uma cobertura térmica mais equilibrada, minimizando zonas de desconforto térmico e garantindo que o fluxo de ar seja adequadamente disperso pelo ambiente, resultando numa maior homogeneidade da temperatura dentro do compartimento.

As unidades interiores e exteriores da marca seleccionada estão ilustradas na Figura 6.19.



Figura 6.19- Sistema Split Mitsubishi (Mitsubishi, 2024).

Na Figura 6.20, é apresentada uma configuração possível para a instalação das unidades de climatização no piso 0, por compartimento. Esta disposição segue a lógica previamente mencionada de dimensionamento, onde cada unidade foi seleccionada com base nas cargas térmicas específicas de cada espaço. O posicionamento das unidades foi cuidadosamente definido para assegurar uma distribuição uniforme do ar climatizado, evitando zonas de desconforto térmico. A mesma estratégia foi aplicada em todos os pisos.

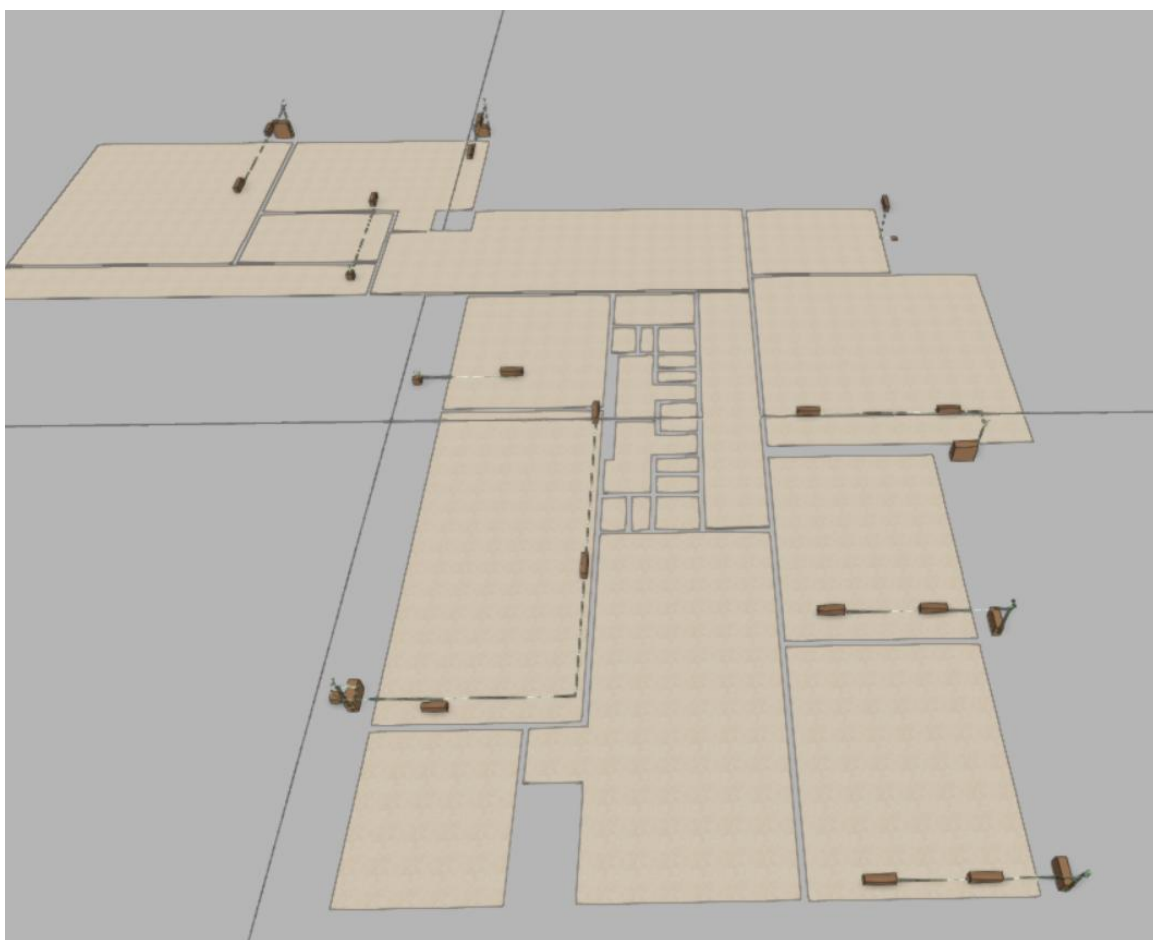


Figura 6.20- Exemplo de disposição da instalação do tipo *split* e *multisplit* no Piso 0 do Edifício.

6.4.1.1 Análise económica

Nesta análise económica, avalia-se a viabilidade da implementação de sistemas de climatização eficientes do tipo *Split* e *Multi Split*, comparando-os com a versão base que inclui a melhoria da envolvente com ETICS e a substituição da iluminação, em que se consideraram as eficiências de referência (SCOP e SEER de 3) para os equipamentos de climatização. São considerados os custos de instalação, manutenção e do consumo energético para determinar o retorno do investimento e a poupança de energia anual.

Como as eficiências para aquecimento e arrefecimento são diferentes, a necessidade de energia eléctrica deve ser calculada de acordo com a equação 10.

$$Nec. Ener. Elétrica = \frac{Ni}{SCOP} + \frac{Nv}{SEER} \quad (10)$$

Onde:

- Nec. Ener. Elétrica representa as necessidades de energia eléctrica para a climatização.
- Ni representa as necessidades de energia útil para aquecimento
- Nv representa as necessidades de energia útil para arrefecimento
- SCOP representa eficiência sazonal para aquecimento
- SEER representa eficiência sazonal de arrefecimento

Na Figura 6.21, são apresentados os consumos de energia da versão base com os equipamentos de climatização de referência (SCOP e SEER de 3) e da versão com a aplicação de sistemas mais eficientes (SCOP de 4,4 e SEER de 6,5).

Modelo/Versão	Envolvente	Split	Unidades
Ni Aquecimento	37,13	37,13	kWh/m ² .ano
Nv Arrefecimento	6,65	6,65	kWh/m ² .ano
Total	43,78	43,78	kWh/m ² .ano
Nec. E.Ele.	14,59	9,46	kWh/m ²
Nec. E.Ele. Edifício	25640,49	16624,23	kWh

Figura 6.21- Necessidades energéticas do edifício com aplicação do sistema *Split*.

Pela análise dos valores apresentados na tabela, pode-se concluir que há uma redução anual de 9016,26 kWh do consumo de energia eléctrica para climatização do edifício. Aplicando a tarifa de energia eléctrica das horas cheias, como explicado na secção 3.8, esta poupança de energia corresponde a uma poupança de custo de 2162,55€ por ano.

O investimento inicial para a aplicação do sistema de climatização *Split* e *Multi Split* foi estimado em 45000€ com base nos valores fornecidos pela empresa LMClima que instala equipamentos da marca Mitsubishi. Este valor inclui não apenas o custo

dos equipamentos, mas também as despesas com tubagem e mão de obra para instalação. Este orçamento reflete uma solução completa que integra a instalação e a aquisição dos equipamentos necessários para a climatização eficiente dos compartimentos do edifício.

O cálculo do *payback*, segundo a equação 8, dá um tempo de retorno de 20 anos e 9 meses, visto que o investimento inicial de 45000€ pode ser considerado elevado em relação à poupança anual de 2162,55€. Um período de retorno tão longo pode não ser atraente do ponto de vista financeiro.

Entretanto, é importante considerar outros fatores além do *payback*, como o aumento do conforto térmico, o aumento da eficiência energética do edifício e a redução de emissões de gases de efeito de estufa e um maior aproveitamento de energias renováveis a nível global. Esta medida é uma das medidas apoiadas pelo fundo ambiental, pelo que havendo uma abertura do fundo ambiental para edifícios de serviços e respetiva candidatura, o valor do investimento pode ser reduzido.

6.4.2 Sistema VRF

Para o dimensionamento do sistema VRF, foi utilizada a mesma metodologia descrita no subcapítulo 6.3 deste documento. Com base nas potências necessárias e de acordo com os catálogos da Mitsubishi, foi selecionado o modelo VRF-T (FDC1350KXZE2), com uma potência total de climatização de 135 kW e SCOP de 3,22 e SEER de 4 (Figura 6.23), com capacidade para alimentar até 80 unidades internas. O equipamento está ilustrado na Figura 6.22.



Figura 6.22- Unidade Exterior Mitsubishi VRF-T FDC1350KXZE2.

Models			FDC1200KXZE2	FDC1250KXZE2	FDC1300KXZE2	FDC1350KXZE2	FDC1425KXZE2	FDC1450KXZE2
Combinations			FDC400KXZE2	FDC400KXZE2	FDC400KXZE2	FDC450KXZE2	FDC475KXZE2	FDC475KXZE2
			FDC400KXZE2	FDC400KXZE2	FDC450KXZE2	FDC450KXZE2	FDC475KXZE2	FDC475KXZE2
			FDC400KXZE2	FDC450KXZE2	FDC450KXZE2	FDC450KXZE2	FDC475KXZE2	FDC500KXZE2
Rated power		HP	42	44	46	48	50	52
Nominal capacity (T=35°C)	Cooling	kW	120.00	125.00	130.00	135.00	142.50	145.00
Power consumption (T=35°C)		kW	32.94	35.94	38.93	41.93	41.91	41.95
Rated energy efficiency coefficient		EER ¹	3.64	3.48	3.34	3.22	3.40	3.46
Nominal capacity (T=7°C)	Heating	kW	135.00	140.00	145.00	150.00	159.00	162.00
Power consumption (T=7°C)		kW	30.68	32.95	35.23	37.50	38.97	39.54
Rated energy efficiency coefficient		COP ¹	4.40	4.25	4.12	4.00	4.08	4.10
Electrical data								
Power		Ph-V-Hz	3Ph-380~415V-50Hz					
Rated current	Cooling	A	52.80	57.60	62.40	67.20	67.80	67.80
Rated current	Heating	A	50.10	53.80	57.50	61.20	63.00	63.90
Maximum current		A	96.00	96.00	96.00	96.00	120.60	120.60
Refrigerant circuit/features								
Refrigerant (GWP) ²			R410A (2088)					
Quantity refrigerant pre-load ³		kg	34.5	34.5	34.5	34.5	34.5	34.5
Tons of CO2 equivalent			72.036	72.036	72.036	72.036	72.036	72.036
Diameter refrigerant pipes ⁴	Liquid	inch (mm)	ø3/4" (19.05)					
	Gas		ø1-1/2" (38.1)					
	Oil balancing		ø3/8" (9.52)					
Product Specifications								
Dimensions	LxHxD	mm	2052x4050x720					
Net weight		kg	996	996	996	996	1134	1134
Max. connectable I.U. ⁵	Min ~ Max	no	3 ~ 80	3 ~ 80	3 ~ 80	3 ~ 80	3 ~ 80	3 ~ 80
	Capacity	%	50 ~ 130	50 ~ 130	50 ~ 130	50 ~ 130	50 ~ 130	50 ~ 130

Figura 6.23- Dados técnicos do equipamento Mitsubishi VRF-T FDC1350KXZE2 (Catálogo Mitsubishi, 2024).

As unidades interiores são selecionadas com a mesma potência e distribuição que as selecionadas para a solução *Split* e Multi *Split*, mas de outra gama, pois unidades interiores *Split* não são compatíveis com equipamentos VRF, que são mais caros. Assim sendo, foram selecionadas as unidades da série FDK90KXZE1, próprias para sistemas VRF, representadas na Figura 6.24 (catálogo Mitsubishi).



Figura 6.24- Unidade interior Mitsubishi FDK90KXZE1.

Assim, foram obtidos os resultados da Figura 6.25.

Modelo/Versão	VRF	Split	Unidades
Ni Aquecimento	37,13	37,13	kWh/m ² .ano
Nv Arrefecimento	6,65	6,65	kWh/m ² .ano
Total	43,78	43,78	kWh/m ² .ano
Nec. E.Ele.	11,35	9,46	kWh/m ²
Nec. E.Ele. Edifício	19937,94	16624,23	kWh

Figura 6.25- Necessidades energéticas do Edifício para VRF e *Split*.

Com base nos resultados obtidos, conclui-se que a climatização com equipamentos do tipo VRF apresenta um consumo anual de energia superior à climatização com equipamentos do tipo *Split*, o que já era esperado, dado que as eficiências de aquecimento e arrefecimento do VRF são inferiores.

Além disso, o elevado custo da unidade exterior, estimado em 30000€ (LMClima), aliado ao custo de aquisição e aplicação das unidades interiores, de 55000€ (LMClima), que por si só são mais caras que as do tipo *Split*, resulta num investimento inicial de 85000€. Dado o elevado custo e a ineficiência em relação às necessidades do edifício, este sistema revela-se inviável para aplicação neste contexto.

6.5 Sistema Fotovoltaico

A energia fotovoltaica aproveita a radiação solar para gerar eletricidade de forma sustentável e descentralizada, reduzindo a dependência de fontes de energia de origem fóssil e consequentemente reduz as emissões de carbono. O dimensionamento de sistemas fotovoltaicos envolve a análise da radiação solar disponível, o perfil de consumo do edifício e as especificações técnicas dos painéis, de modo a otimizar a produção de eletricidade para autoconsumo (APA, 2021).

Para ajudar no dimensionamento do sistema recorreu-se ao *software* Sunny Design. O Sunny Design é um *software* disponibilizado pela marca SMA de inversores e permite o dimensionamento de sistemas fotovoltaicos com e sem autoconsumo, sistemas autónomos, sistemas híbridos fotovoltaicos e sistemas energéticos. Além disso, permite também simular a quantidade de energia fotovoltaica produzida que será utilizada para autoconsumo, tendo em conta os dados de monitorização do diagrama de carga de uma instalação com intervalos de 15 em 15 minutos para todos os dias do ano, ou simplesmente usar os dados de uma semana ou de um dia. Para além disso, é um *software* de fácil e de grátis utilização. (Faísca, 2019)

O primeiro passo para dimensionar um sistema de fotovoltaicos para autoconsumo, deve ser a análise do diagrama de carga do edifício. Para o efeito, foram feitas 3 leituras semanais da potência consumida do edifício em 3 meses distintos para estações distintas, como já foi abordado no subcapítulo 3.8. Desses dados, consideram-se relevantes para o dimensionamento dos sistemas fotovoltaicos, os valores das potências de pico e potências médias diurnas. A potência média diurna para março é de 6,9 kW e a potência de pico é 15 kW; a potência média diurna para junho é 4,1 kW e a máxima é 15 kW; a potência média diurna para dezembro 10,9 kW e a máxima é de 28,5 kW. Estes valores são importantes pois dão uma indicação das potências FV a serem testadas de forma a determinar qual a potência FV mais adequada com base na taxa de autoconsumo e na taxa de autonomia do edifício.

Como explicado na secção 3.8, estimou-se que o consumo do edifício corresponde a 4,4% do consumo total do ISEC. Essa taxa foi aplicada ao diagrama de carga anual

do ISEC, correspondente a 35040 medições da potência ativa realizadas de 15 em 15 minutos durante as 24h dos 365 dias do ano.

Na Figura 6.26 são apresentados, para o ISEC, os valores das potências máxima, mínima e média, bem como da energia consumida por mês do ano de 2023, traduzindo-se num consumo anual de 806 315 kWh, dados estes que foram obtidos a partir dos diagramas de carga mensais do ISEC. No caso do edifício estimou-se um consumo anual foi cerca de 35480 kWh.

ISEC	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Total
Pmax (kW)	256	292	263	220	215	247	210	106	250	256	247	308	—
Pmin (kW)	51	54	53	52	53	53	52	47	52	51	50	46	—
Pmed (kW)	96	110	104	83	91	95	86	58	90	96	100	95	—
Energia (kWh)	71600	73631	77445	59841	67985	68380	64243	43360	65093	71655	72249	70836	806315

Figura 6.26– Consumo de energia anual do ISEC.

A localização do ISEC é Latitude: 40.19267° N e Longitude: -8.41161°, então a inclinação dos painéis, com azimute a Sul será de 35°.

Para esta instalação, foi definido o painel A630-MAH72Mw (Figura 6.27), da marca AIKO, com 144 células e eficiência de 23.9%, por se tratar de um painel com uma potência de pico alta. Na Figura 6.28, apresentam-se as suas características.



Figura 6.27- Painel Fotovoltaico AIKO- A630-MAH72Mw (Catálogo AIKO,2023).

Electrical Characteristics (STC: AM1.5 1000W/m ² 25°C NOCT: AM1.5 800W/m ² 20°C 1m/s)										Power Tolerance: 0~ + 3%
Model	AIKO-A610-MAH72Mw		AIKO-A615-MAH72Mw		AIKO-A620-MAH72Mw		AIKO-A625-MAH72Mw		AIKO-A630-MAH72Mw	
Test Conditions	STC	NOCT	STC	NOCT	STC	NOCT	STC	NOCT	STC	NOCT
P _{max} [W]	610	459	615	463	620	467	625	471	630	474
V _{oc} [V]	54.19	51.18	54.29	51.27	54.39	51.36	54.49	51.46	54.59	51.55
V _{mp} [V]	44.88	42.38	44.98	42.48	45.08	42.57	45.18	42.67	45.28	42.76
I _{sc} [A]	14.36	11.61	14.44	11.68	14.52	11.74	14.60	11.81	14.68	11.87
I _{mp} [A]	13.60	10.85	13.68	10.91	13.76	10.98	13.84	11.04	13.92	11.11
Module Efficiency	23.2%		23.3%		23.5%		23.7%		23.9%	

Figura 6.28- Dados técnicos dos painéis fotovoltaicos A630-MAH72Mw (Catálogo AIKO,2023).

Com base na potência FV pretendida (Nº de painéis * a potência do painel), na orientação (sul) e inclinação dos painéis (latitude -5° = 35°) e no ficheiro climático o *software* calcula a energia produzida pelos painéis ao longo do dia e para todos os dias do ano. Fazendo o upload do ficheiro CSV com os 35040 valores de potência relativos ao diagrama de carga do edifício, o *software* cruza essa informação com o da produção de energia FV e determina qual a quantidade de energia que é autoconsumida e qual a quantidade de energia que é injetada na rede.

Tendo por base as potências médias e de pico do edifício obtidas nos meses de meia estação e de estação quente, optou-se por testar 5 valores de potências FV diferentes entre 5 e 15 kWp.

Para efeitos do cálculo do retorno do investimento considerou-se um custo de 1300€/kWp, que é um valor indicativo para projetos de instalação chave na mão, a tarifa de compra de eletricidade à rede de 0,2429€/kWh apresentada na secção 3.8 e que a energia não consumida é injetada na rede a custo zero.

Na Figura 6.29 são apresentados os resultados obtidos para as 5 simulações realizadas.

Instalação FV		Opção1	Opção2	Opção3	Opção4	Opção5
Potência Pico	kWp	5,67	8,19	10,08	11,97	14,49
Qt. Modulos	Und.	9	13	16	19	23
Area total de painéis	m ²	23,7	34,2	42,1	50,0	60,5
Nº Inversores	Und.	1	1	1	1	1
Potência nominal Inversores	kW	5	8	12	12	15
Relação de Potencia	%	88,2	97,7	119	100,3	103,5
Produção anual FV	kWh	9585	14024	17147	20412	24745
Autoconsumo	kWh	8778	11659	13258	14521	15699
Poupança anual	€	2132	2832	3220	3527	3813
Poupança total após 20 ano(s)	€	44285	57948	64753	69522	72733
Quota autoconsumo	%	91,6	83,1	77,3	71,1	63,4
Taxa de autonomia	%	24,7	32,9	37,4	40,9	44,2
Payback	anos	3,5	3,8	4,2	4,5	5,1
Taxa Interna Rentabilidade (TIR)	%	29,7	27,4	25,3	23,3	20,7

Figura 6.29 - Valores obtidos para instalação do sistema fotovoltaico.

Os resultados obtidos mostram que, com o aumento da potência de pico, a quota de autoconsumo diminui, isto é, há mais energia que é injetada na rede elétrica de serviço público (RESP). Por outro lado, a taxa de autonomia aumenta, o que significa que menor quantidade de energia é adquirida da rede e consequentemente menores serão os custos anuais com a compra da eletricidade.

Para uma melhor compreensão deste acontecimento, na Figura 6.30 observa-se o balanço energético da Opção 1, com valores detalhados na Figura 6.31 e na Figura 6.32 o balanço energético da Opção 5, com valores detalhados na Figura 6.33.

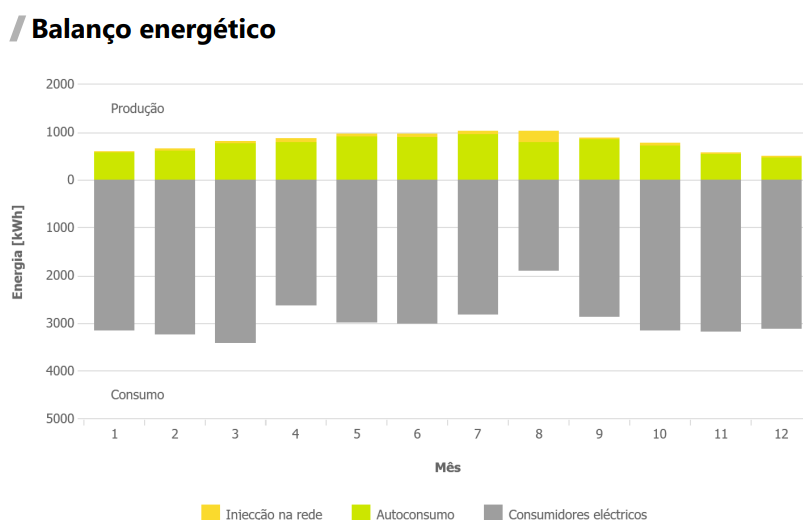


Figura 6.30- Balanço energético do sistema fotovoltaico da Opção 1.

Mês	Rendimento energético [kWh]	Autoconsumo [kWh]	Injeção na rede [kWh]	Consumo de energia da rede [kWh]
1	588 (6,1 %)	570	18	2581
2	657 (6,9 %)	602	55	2638
3	805 (8,4 %)	760	45	2650
4	863 (9,0 %)	778	84	1855
5	957 (10,0 %)	904	53	2088
6	961 (10,0 %)	897	64	2115
7	1019 (10,6 %)	948	71	1878
8	1021 (10,6 %)	781	240	1127
9	882 (9,2 %)	838	43	2026
10	774 (8,1 %)	709	65	2442
11	564 (5,9 %)	531	34	2647
12	495 (5,2 %)	461	34	2656

Figura 6.31 - Valores consumidos e injetados na RESP para a Opção 1.

/ Balanço energético

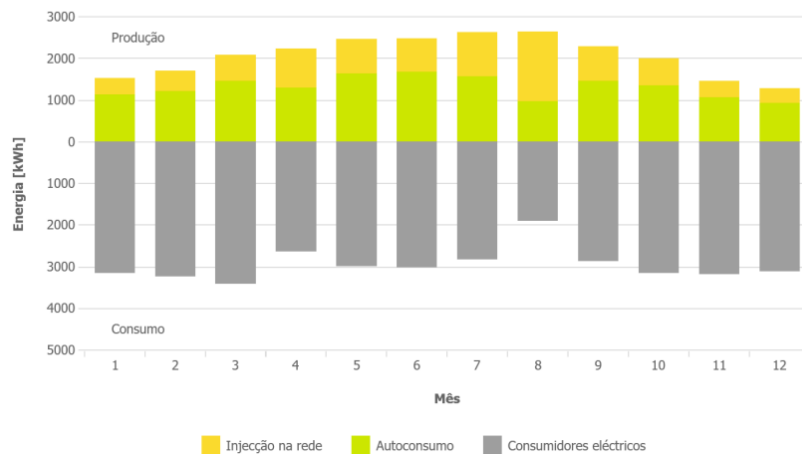


Figura 6.32- Balanço energético do sistema fotovoltaico da Opção 5.

Mês	Rendimento energético [kWh]	Autoconsumo [kWh]	Injecção na rede [kWh]	Consumo de energia da rede [kWh]
1	1516 (6,1 %)	1125	391	2025
2	1698 (6,9 %)	1216	482	2024
3	2085 (8,4 %)	1452	633	1958
4	2231 (9,0 %)	1297	934	1336
5	2467 (10,0 %)	1635	833	1357
6	2478 (10,0 %)	1669	809	1343
7	2628 (10,6 %)	1558	1070	1268
8	2633 (10,6 %)	959	1673	948
9	2279 (9,2 %)	1459	820	1405
10	1998 (8,1 %)	1340	658	1811
11	1455 (5,9 %)	1058	396	2120
12	1276 (5,2 %)	929	346	2187

Figura 6.33- Valores consumidos e injetados na RESP para a Opção 5.

Deste modo, com a análise dos resultados dos gráficos e tabelas mencionados anteriormente, confirma-se que com o aumento da potência FV, a produção de energia aumenta, mas consequentemente quantidade de energia injetada na RESP também aumenta. De notar que no mês de agosto, devido à não utilização do edifício o autoconsumo é baixo e consequentemente a injeção na rede é muito grande devido à alta produção nesse mês.

Tratando-se de um edifício de ensino, a escolha da opção dependerá principalmente da disponibilidade financeira para o investimento inicial e/ou de apoios ou fundos públicos que incentivem, pois, todas as opções se podem considerar viáveis. As taxas de autoconsumo variam entre 91 e 63% e as taxas de autonomia variam entre 25 e 44% e, a nível económico, os períodos de retorno do investimento variam entre 3,5 e 5,1 anos e a TIR varia entre 29,7 e 20,7%, o que são considerados aceitáveis.

Havendo limitações a nível do investimento recomenda-se a opção 1 com potência FV de 5,67 kWp, que tem o período de retorno mais baixo (3,1 anos), apresenta a TIR mais alta (29%) e permite um maior aproveitamento da energia FV produzida, com uma taxa de autoconsumo de 91%. Por outro lado, não havendo problemas de financiamento, a opção 5 com a potência FV de 14,49 kWp, traduz-se ao longo da vida útil dos painéis numa maior poupança de custos de cerca de 72733€ ao fim de 20 anos, ou seja, uma poupança adicional de 28 448€ quando comparado com a Opção 1.

Admitindo que se opta pela Opção 1, torna-se necessária a seleção de um inversor. Num sistema fotovoltaico (FV), quando se pretende alimentar cargas que operam em corrente alternada, é necessário um dispositivo que converta a corrente contínua gerada pelo sistema FV em corrente alternada. Esse papel é desempenhado pelo inversor, que possibilita a integração do sistema com equipamentos e redes elétricas de corrente alternada, como demonstra a Figura 6.34.

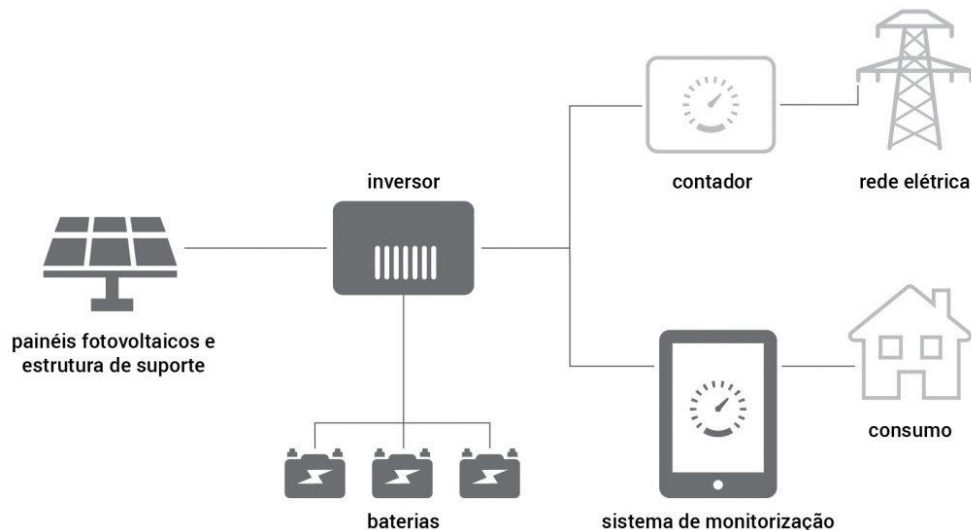


Figura 6.34- Esquema de instalação fotovoltaica (Tiago Faísca, 2019).

Uma opção válida para escolha do inversor, para uma potência FV de 5,67 kWp (9 painéis FV fr 650Wp), é o modelo STP5.0-3AV-40, da marca SMA, ilustrado na Figura 6.35. O modelo STP5.0-3AV-40 possui uma potência nominal de saída em corrente alternada (CA) de 5,0 kW. A tensão máxima de entrada em corrente contínua (CC) é de 1.000 V, com uma corrente máxima de entrada de 12 A por *string*. O intervalo de tensão dos MPPTs (*Maximum Power Point Tracking*) varia entre 260 V e 800 V, otimizando a conversão da energia solar em condições variáveis. Além disso, apresenta uma eficiência máxima de 98,4%. As suas características técnicas estão detalhadas na Figura 6.36.



Figura 6.35- Inversor Trifásico STP5.0-3AV-40 (Catálogo SMA, 2024).

Dados técnicos	Sunny Tripower 3.0	Sunny Tripower 4.0	Sunny Tripower 5.0	Sunny Tripower 6.0
Entrada (CC)				
Potência máx. do gerador fotovoltaico	6000 Wp	8000 Wp	9000 Wp	9000 Wp
Tensão máx. de entrada	850 V	850 V	850 V	850 V
Intervalo de tensão MPP	140 V a 800 V	175 V a 800 V	215 V a 800 V	260 V a 800 V
Tensão atribuída de entrada	580 V			
Tensão mín. de entrada/Tensão de entrada inicial	125 V/150 V			
Corrente máx. de entrada Entrada A/Entrada B	12 A/12 A			
Corrente máx. de curto-circuito Entrada A/Entrada B	18 A/18 A			
Número de entradas MPP independentes/strings por entrada MPP	2/A:1; B:1			
Saída (CA)				
Potência atribuída (com 230 V, 50 Hz)	3000 W	4000 W	5000 W	6000 W
Potência aparente CA máx.	3000 VA	4000 VA	5000 VA	6000 VA
Tensão nominal CA	3/N/PE; 220 V / 380 V 3/N/PE; 230 V / 400 V 3/N/PE; 240 V / 415 V			
Intervalo de tensão CA	180 V a 280 V			
Frequência de rede CA / intervalo	50 Hz / 45 Hz a 55 Hz 60 Hz / 55 Hz a 65 Hz			
Frequência de rede atribuída/tensão de rede atribuída	50 Hz/230 V			
Corrente máx. de saída	3 x 4,5 A	3 x 5,8 A	3 x 7,6 A	3 x 9,1 A
Factor de potência na potência atribuída / factor de desfasamento ajustável	1 / 0,8 sobreexcitado a 0,8 subexcitado			
Fases de injeção/fases de ligação	3 / 3			
Rendimento				
Rendimento máx./rend. europeu	98,2 % / 96,5 %	98,2 % / 97,1 %	98,2 % / 97,4 %	98,2 % / 97,6 %

Figura 6.36- Características técnicas do inversor Trifásico STP5.0-3AV-40 (Catálogo SMA, 2024).

Para a aplicação da instalação dos painéis fotovoltaicos, pode ser utilizado o telhado assinalado na Figura 6.37 pois tem área mais que suficiente para a instalação de qualquer uma das opções.

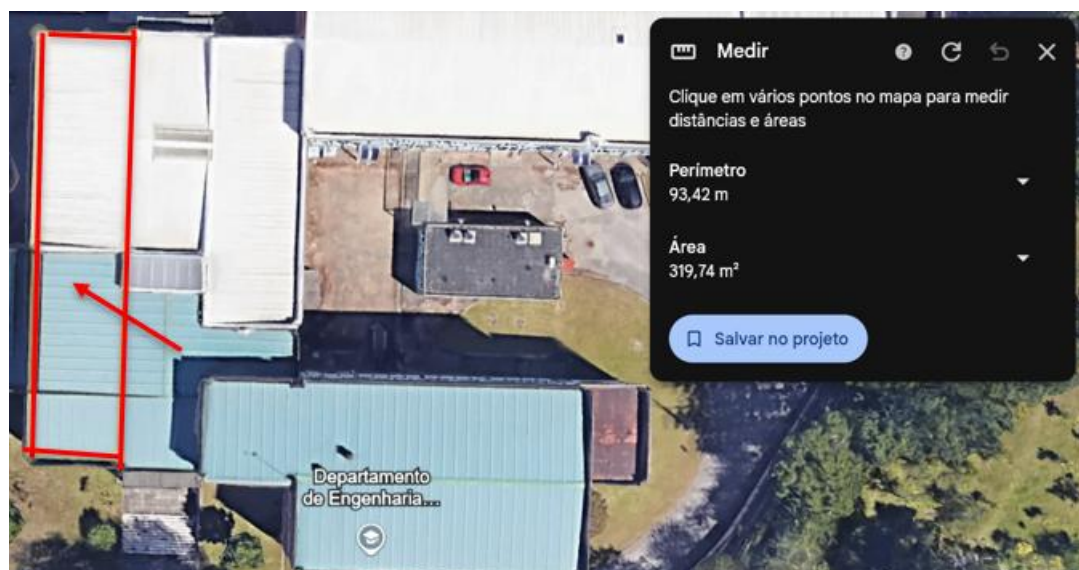


Figura 6.37- Representação do telhado do Edifício.

6.6 Determinação da Classe Energética do Edifício

Nesta secção é feito o cálculo da classe energética do Edifício, considerando as métricas de eficiência definidas para este tipo de edifícios. A metodologia utilizada foi previamente abordada na Secção 2.2.3, onde se detalhou a fórmula aplicada para a obtenção da classe energética, seguindo a metodologia definida no Manual do Sistema de Certificação Energética de Edifícios (Manual SCE, 2021). Deste modo, para proceder ao cálculo do rácio RIEE (Secção 2.2.3), é necessário determinar o Indicador de Eficiência Energética de Referência ($IEE_{ref,s}$) e o Indicador de Eficiência Energética (IEE_s).

O Indicador de Eficiência Energética de Referência ($IEE_{ref,s}$) representa o consumo energético padrão para um edifício com características semelhantes.

O cálculo deste indicador determina-se pela equação 11.

$$IEE_{ref} = IEE_{ref,S} + IEE_{ref,T} [kWh_{EP} / (m^2 \cdot ano)] \quad (11)$$

Onde:

- $IEE_{ref,S}$ representa o indicador de eficiência energética de referência associado aos consumos do tipo "S", que abrangem necessidades básicas de conforto e funcionalidade, como aquecimento, arrefecimento e iluminação
- $IEE_{ref,T}$ representa o indicador de eficiência energética de referência associado aos consumos do tipo "T", que dizem respeito aos equipamentos técnicos e outras funcionalidades específicas do edifício.

Para o cálculo deste indicador de referência, foram contabilizados apenas os consumos do tipo "S", uma vez que os consumos de tipo "T" do Edifício em questão podem ser desprezados pelo facto de o elevador existente quase nunca é utilizado. Os consumos do tipo "S" englobam as necessidades energéticas relacionadas com aquecimento, arrefecimento, ventilação e iluminação. Os consumos que se enquadram em cada tipo, estão descritos na Figura 6.38.

Consumos tipo S	Consumos tipo T
Aquecimento e arrefecimento ambiente para conforto humano, incluindo humedificação e desumidificação	Aquecimento e arrefecimento não destinados para conforto humano
Ventilação que serve espaços interiores úteis, exceto hotes	Ventilação que serve espaços interiores não úteis e hotes
Bombagem associada à preparação de AQS e AQP e a sistemas de climatização para conforto humano em espaços interiores úteis	Bombagem em sistemas de climatização não destinados para conforto humano em espaços interiores não úteis
Preparação de AQ	Equipamentos de frio, incluindo câmaras de refrigeração
Iluminação fixa dos espaços interiores úteis e não úteis	Iluminação dedicada, de emergência e exterior
	Instalações de elevação e outros equipamentos e sistemas não incluídos nos consumos do tipo S

Figura 6.38 – Tipo de consumos energia (Manual SCE, 2023).

Para calcular o valor do indicador IEE_{ref} , este segue a equação 12.

$$IEE_{ref} = \frac{1}{A_p} * \sum (E_{ref,s,i} * F_{pu,i}) \quad [kWh_{EP}/(m^2 \cdot ano)] \quad (12)$$

Onde:

- A_p é a área útil de pavimento do edifício [m^2]
- $E_{ref,s,i}$: representa o consumo energético de referência para o serviço "S" em cada fonte de energia i, medido em [kWh/ano].
- $F_{pu,i}$: é o fator de conversão da energia útil para energia primária para a fonte de energia i, expresso em [kWh_{EP}/kWh].

Como se pode verificar pela Figura 6.39, a eficiência de referência dos sistemas de climatização de referência é de 3,40 para aquecimento e 3,00 para arrefecimento, para o cálculo da energia consumida do Edifício de referência.

Uso regulado	Sistema no edifício previsto	Eficiência a considerar no edifício de referência
Aquecimento	Sistema que recorre a queima de combustível	0,89
	<i>Split, multisplit</i> e VRF com permuta exterior a ar	3,40
	Unidades compactas com permuta exterior a ar	3,20
	<i>Split, multisplit</i> e VRF com permuta exterior a água	3,70
	Unidades compactas com permuta exterior a água	4,40
	<i>Rooftop</i> com permuta exterior a ar	3,20
	<i>Rooftop</i> com permuta exterior a água	4,40
	Chiller bomba de calor de compressão com permuta exterior a ar	3,00
	Chiller bomba de calor de compressão com permuta exterior a água	4,15
	Cogeração ou trigeração	1,00
	Outros sistemas que recorram a eletricidade	1,00
	Sistema por defeito	1,00
Arrefecimento	<i>Split, multisplit</i> e VRF permuta exterior a ar	3,00
	Unidades compactas permuta exterior a ar	2,80
	<i>Split, multisplit</i> e VRF permuta exterior a água	3,30
	Unidades compactas permuta exterior a água	4,10
	<i>Rooftop</i> com permuta exterior a ar	2,80
	<i>Rooftop</i> com permuta exterior a água	4,10
	Chiller bomba de calor de compressão com permuta exterior a ar	2,90
	Chiller bomba de calor de compressão com permuta exterior a água	4,65
	Cogeração ou trigeração	1,00
	Outros sistemas que recorram a eletricidade	3,00
	Sistema por defeito	3,00

Figura 6.39 – Eficiências de referência (Manual SCE, 2023).

Segundo a legislação em vigor em Portugal o fator de conversão de energia útil para energia primária para a eletricidade é de 2,5 (Figura 6.40) e foi utilizado em todos os cálculos.

Tipo de energia	F_{pu} [kWh _{EP} /kWh]
Eletricidade, independentemente da origem (renovável ou não renovável)	2,5
Combustíveis sólidos, líquidos ou gasosos não renováveis	1,0
Energia térmica de origem renovável	1,0
Energia proveniente da rede urbana de frio e calor da Climaespaço, Parque das Nações, Lisboa	1,06
Energia proveniente de sistemas de cogeração no edifício de referência	1,86
Energia proveniente de sistemas de trigeração no edifício de referência	1,70

Figura 6.40 – Fatores de conversão de energia final para energia primária (Manual SCE, 2023).

Aplicando os valores obtidos no *software* CYPE para as necessidades de energia útil para aquecimento e arrefecimento, bem como os valores calculados para a iluminação (consumo de 9838kWh/ano pelas lâmpadas fluorescentes), nas fórmulas correspondentes, obteve-se o Indicador de Eficiência Energética de Referência que corresponde a um valor de 58,50 kWh_{EP}/m².ano (Figura 6.41).

	E . Útil kWh/m ²	E. Consumida kWh/m ²	E. Primária kWh/m ²
Aquecimento	53,1	15,6	39,0
Arrefecimento	9,23	3,1	7,7
Iluminação		5,6	11,8
		Total	58,5

Figura 6.41- IEE para o Edifício referência.

De seguida procedeu-se ao cálculo do indicador de eficiência energética do edifício real para o modelo de base e para o modelo com a aplicação das medidas de melhoria propostas. O cálculo desse indicador segue a equação 13.

$$IEE = IEE_s - IEE_{ren} [kWh_{EP} / (m^2 \cdot ano)] \quad (13)$$

Onde:

- IEE_s : representa o indicador de eficiência energética relacionado aos consumos do tipo "S", como aquecimento, arrefecimento, ventilação e iluminação, para as necessidades energéticas do edifício;
- IEE_{ren} : representa o indicador de eficiência energética associado à produção de energia renovável destinada ao autoconsumo no edifício.

Para efeitos de cálculo deste indicador não vai ser considerada a parcela de energia renovável associada aos sistemas de ar condicionado (AC) em nenhuma das situações. No edifício real somente 7 espaços têm sistemas de AC, mas em 3 deles a utilização é muito pontual, por isso, optou-se por não contabilizar essa parcela E_{ren} , assim o IEE deste modelo é calculado somente pelo IEE_s (equação 14).

$$IEE_s = \frac{1}{A_p} * \sum (E, s, i * F_{pu, i}) [kWh_{EP} / (m^2 \cdot ano)] \quad (14)$$

Onde:

- E, s, i : Consumo de energia por fonte de energia i para os usos do tipo S , [kWh/ano];
- A_p : Área interior útil de pavimento, [m²];
- $F_{pu, i}$: Fator de conversão de energia útil para energia primária [kWh_{EP}/kWh].

Para o modelo de base, como já referido anteriormente, as eficiências dos equipamentos de climatização consideradas foi de 3 para aquecimento e 3 para arrefecimento. Para este cálculo foi considerado o consumo de energia pela iluminação fluorescente.

O valor obtido para o IEE do modelo base é dado na Figura 6.42, que é de 66,3 kWh_{EP}/m².ano.

	E . Útil kWh/m ²	E. Consumida kWh/m ²	E. Primária kWh/m ²
Aquecimento	58,2	19,4	48,5
arrefecimento	4,5	1,5	3,8
Iluminação		5,6	14,0
		Total	66,3

Figura 6.42- IEE do Edifício Base.

Com base nos resultados obtidos para o IEE_{ref} do Edifício de referência e o IEE do modelo de base do obteve-se um valor de RIEE de 1,13, o que pela Equação 1, corresponde a uma classe energética de C.

Para proceder ao cálculo da classe energética do edifício com a implementação das medidas de melhoria, a metodologia é similar à anterior (Equação 13), com a inclusão do IEE_{REN} , uma vez que uma das medidas de melhoria é a instalação de um sistema fotovoltaico para autoconsumo. Para este cálculo foi considerada a opção1, da secção 6.5 deste relatório, que corresponde a uma potência FV de 5,67 kWp e a uma energia anual autoconsumida de 8778 kWh. Foi também considerada que a medida da substituição da iluminação por tecnologia LED foi implementada, passando o consumo de energia anual para iluminação a ser de 4070kWh. Por outro lado, as necessidades de energia útil para aquecimento e para arrefecimento também diminuiram com a aplicação do isolamento, tendo resultado num valor de 14,68 kWhEP/m².ano, como se representa na Figura 6.43.

	E . Útil kWh/m ²	E. Consumida kWh/m ²	E. Primária kWh/m ²
Aquecimento	33,130	7,53	18,82
arrefecimento	6,650	1,02	2,56
Iluminação		2,32	5,79
FV1		5,00	12,49
		Total	14,68

Figura 6.43– IEE para o Edifício com as medidas de melhoria aplicadas.

Com base nos resultados obtidos para o IEE_{ref} do Edifício de referência e o IEE do edifício com a implementação das medidas de melhoria, obteve-se um valor de RIEE de 0,25, o que pela Equação 1, corresponde a uma classe energética de A+.

Desta forma, pode-se concluir que a implementação das medidas propostas melhorou significativamente a classe energética do edifício.

6.7 Cálculo das emissões de dióxido de carbono evitadas

Nesta secção, e visto que foi possível determinar a quantidade de eletricidade poupada com a aplicação das medidas relativamente ao modelo de base, assim como a quantidade de eletricidade autoconsumida do sistema FV, optou-se por calcular a quantidade de emissões de dióxido de carbono (CO₂) evitadas associadas.

Para o cálculo das emissões de CO₂ evitadas, com a aplicação das medidas de melhoria da eficiência energética do edifício, que se traduziram em poupança de energia elétrica com a climatização e iluminação e na produção local de eletricidade para autoconsumo, foi considerado um fator de emissão da eletricidade de 257gCO₂/kWh, que é um valor médio dos 5 anos anteriores estimado pela Agência Portuguesa do Ambiente (APA, 2022).

Com a implementação das medidas de melhoria da envolvente do edifício e com a aplicação de sistemas de climatização e de iluminação mais eficientes obteve-se uma poupança de 25877 kWh anuais, quando comparado com o modelo de base. De relembrar que no modelo de base considerou-se que todos os espaços úteis eram climatizados, o que não acontece no edifício real, e daí o consumo de eletricidade para climatização ser superior ao real. Além disso, deve também considerar-se o autoconsumo do sistema fotovoltaico, de valor 8778 kWh, pois será energia que não se consumirá da RESP, evitando-se também emissões de CO₂.

Na Figura 6.44, é apresentada a quantidade de emissões de CO₂ evitadas anualmente, o que corresponde a 6650 kg de CO₂ evitado devido às medidas de poupança de energia e a 2256 kg de CO₂ evitados devido à eletricidade produzida localmente que não foi adquirida da rede elétrica. Esta redução de emissões de CO₂ corresponde a uma redução 55% de emissões relativamente ao modelo base, a nível da climatização e da iluminação. Considerando a produção FV para a autoconsumo a redução é de 74%.

	kWh /ano	kg CO2/kWh	kg CO2 evitado
Poupança com medidas de melhoria	25877	0,257	6650
FV Autoconsumo	8778	0,257	2256
		Total	8906

Figura 6.44-Quantidade de CO₂ evitado.

7 CONCLUSÃO

A análise da eficiência energética em edifícios é importante para que se reduza consumo energético global, dado que o setor dos edifícios é responsável pelo consumo de 40% da energia final na Europa e 36% das emissões de gases com efeito de estufa (GEE), a nível da UE. Alinhado com os objetivos energéticos e ambientais estabelecidos pela União Europeia, o presente trabalho procurou avaliar as necessidades energéticas do edifício EM e EEM e propor soluções de melhoria de forma a aumentar a eficiência energética do mesmo reduzindo o consumo de energia e respetivos custos, assim como a redução de GEE.

Para atingir esses objetivos foram implementadas primeiramente duas medidas: a substituição das lâmpadas fluorescentes por lâmpadas LED, com o intuito de reduzir o consumo energético associado à iluminação, e a aplicação de ETICS na envolvente opaca exterior, aumentando o isolamento térmico e reduzindo as perdas de calor, o que tem um impacto direto na eficiência do edifício. Com base nos resultados obtidos a nível energético e económico, recomenda-se que estas duas medidas propostas devem ser adotadas para melhorar o desempenho energético do edifício.

Adicionalmente, foram avaliadas outras estratégias de climatização passiva, incluindo a instalação de palas de sombreamento e de vidros de baixa emissividade térmica. Apesar destas soluções reduzirem as cargas térmicas, permitindo reduzir as potências dos equipamentos a instalar, verificou-se que o consumo de energia anual para a climatização aumentou relativamente à situação anterior. Além disso, os custos de implementação destas medidas são elevados, tornando estas soluções pouco apelativas do ponto de vista técnico-económico.

Na análise dos sistemas de climatização ativa, foram considerados dois tipos de sistemas distintos. O primeiro sistema estudado foi a tecnologia do tipo *Split* e *Multi Split*. Este sistema permite flexibilidade de instalação e manutenção, bem como um controlo independente da climatização em diferentes zonas, ajustando-se ao perfil de uso e ocupação dos espaços. O segundo sistema estudado foi o sistema VRF, em que uma única unidade exterior alimentaria todas as unidades interiores, que é uma tecnologia que pode oferecer vantagens em edifícios de grande porte e alta complexidade com requisitos de controlo de temperatura precisos. A análise dos resultados obtidos nas duas soluções permitiu concluir que, para este edifício em questão atendendo ao seu perfil de consumo, é mais vantajosa a aplicação dos sistemas do tipo *Split* selecionados, visto que para além de apresentarem uma eficiência superior o custo do investimento é inferior ao dos VRF.

Para aumentar a autonomia energética do edifício e integrar fontes de energia renovável, realizou-se um estudo e dimensionamento de um sistema fotovoltaico, baseado na análise detalhada do diagrama de carga do Edifício, obtido através de leituras reais do seu consumo em três estações distintas. Esta análise permitiu dimensionar o sistema fotovoltaico que mais se adequa tendo em consideração o perfil de consumo do edifício, ajustando a capacidade FV instalada para otimizar o

autoconsumo. Conclui-se que a potência FV de 5,67 kWp é mais vantajosa quando comparada com as outras opções estudadas, visto que apresenta o tempo de retorno mais baixo, a TIR mais alta e uma taxa de autoconsumo de 91%, o que significa que a grande maioria da energia produzida pela instalação FV é autoconsumida.

A implementação das medidas propostas permitiu uma melhoria significativa na classificação energética do edifício, que passou da classe C para a classe A+. A nova classificação reflete uma redução considerável das necessidades de energia primária do edifício, alinhando o edifício com os padrões de eficiência estabelecidos pela legislação e pela UE. Adicionalmente, a aplicação destas medidas resulta também numa redução de 8,906 kg de emissões de CO₂ do edifício por ano, o que corresponde a uma redução de 74% relativamente ao modelo de base do edifício.

Em resumo, a melhoria do desempenho energético de edifícios existentes, como o caso de estudo apresentado neste relatório, não só contribui para a redução dos consumos energéticos e respetivos custos de operação e das emissões de gases com efeito de estufa, como contribui para a melhoria do conforto térmico dos ocupantes. Este estudo pretende, assim, servir como um exemplo real e de fundamentação para que as medidas de melhoria propostas sejam implementadas.

Ao longo do projeto, não foi incluída a componente de ventilação no edifício, uma vez que esta não está presente na realidade e também não constituía um dos objetivos de estudo. Recomenda-se, portanto, que em projetos futuros essa vertente seja abordada, dada a importância de garantir uma boa qualidade do ar em edifícios de ensino.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADENE – Agência para a Energia. (2020). Eficiência Energética e Conforto Térmico. Disponível em <https://www.adene.pt>
- ADENE – Agência para a Energia. (2021). Manual Técnico para a Avaliação do Desempenho Energético dos Edifícios.
- ADENE – Agência para a Energia. (2024). Manual do Sistema de Certificação Energética (SCE). Portugal.
- AIKO. (2024). Catálogo AIKO 2024.
- American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE). (2017). ASHRAE Handbook – Fundamentals.
- APA - Agência Portuguesa do Ambiente, Energia e Clima. (2021). Disponível em https://rea.apambiente.pt/dominio_ambiental/energia_e_clima.
- APFAC - Associação Portuguesa de Fabricantes de Aberturas e Caixilharias. (2021). Guia Técnico.
- Brito, B. (2017). Estágio no domínio da climatização de edifícios e material circulante na CP. Instituto Superior de Engenharia de Lisboa.
- Comissão Europeia. (2022). Objetivo 55: Alcançar a redução de emissões de 55% até 2030.
Disponível em: https://ec.europa.eu/clima/policies/fit-for-55_pt
- Comissão Europeia. (2023). *Quarterly report on European gas and electricity markets*. Disponível em <https://energy.ec.europa.eu>
- Comissão Europeia. (2024). Relatório de Estado da União da Energia (State of the Energy Union Report) 2024. Disponível no site da Comissão Europeia (atualize o link conforme a publicação específica quando disponível).
- Cunha, M. (2005). Estratégias passivas para a otimização do desempenho energético de edifícios no âmbito do REH. Dissertação de mestrado, Universidade da Beira Interior.
- CYPE Ingenieros, S.A. (2024). Manual do Utilizador, CYPE.
- DGEG - Direção-Geral de Energia e Geologia. (2023). Balanço Energético Nacional 2022.
- DGEG - Direção-Geral de Energia e Geologia. (2024). Energia em Números: Edição 2024. Disponível em <https://www.dgeg.gov.pt/pt/destaques/energia-em-numeros-edicao-2024/>
- Direção-Geral de Energia e Geologia - Agência de Energia Nacional (DGEG-AEN). (2023). Energia em Números 2023. DGEG.

- Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos - Regulamento Tarifário do setor elétrico de 2023 Regulamento n.º 828/2023. publicado no Diário da República, 2.ª Série, n.º 146, de 28 de julho de 2023
- ETICS Association. Technical Guidelines for External Thermal Insulation Composite Systems (ETICS). Disponível em <https://www.etics-association.org>.
- EDP - Energias de Portugal. (2024). Fatura de energia elétrica
- Gonçalves, J. (2016). Desenvolvimento de Aplicação para o Cálculo da Condução Térmica em Edifício. Dissertação de Mestrado, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa.
- IEA - International Energy Agency. (2023). Energy Technology Perspectives 2023. IEA.
- IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. (2021). Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Cambridge University Press.
- IPQ - Instituto Português da Qualidade. (2015). Norma Portuguesa NP 1037-1:2015 – Ventilação de edifícios com ou sem aparelhos a gás: Parte 1: Edifícios de habitação: Ventilação natural. Caparica, Portugal: IPQ.
- IPQ - Instituto Português da Qualidade. NP EN ISO 52000 – Desempenho energético dos edifícios – Parte 1: Estrutura geral e procedimentos de avaliação.
- ISEC - Instituto Superior de Engenharia de Coimbra. Site oficial do Instituto Superior de Engenharia de Coimbra. Disponível em <https://isec.pt/PT/Default.aspx>
- Mitsubishi Electric. (2024). Catálogos. Disponível em <https://www.mitsubishielectric.com>
- Pereira, S. (2013). Climatização Passiva em Edifícios de Serviço. Instituto Superior de Engenharia de Lisboa.
- Portugal. (2013). Despacho (extrato) n.º 15793-F/2013. Diário da República, 2.ª série, N.º 234, de 3 de dezembro de 2013
- Portugal. (2020). Decreto-Lei n.º 101-D/2020. Diário da República n.º 253/2020, Série I de 2020-12-31.
- Portugal. (2021). Despacho n.º 6476-D/2021. Diário da República n.º 126/2021, 1.º Suplemento, Série II de 2021-07-01.
- Portugal. (2021). Portaria n.º 138-G/2021. Diário da República n.º 127-B/2021, Série II de 2021-06-30.
- União Europeia. (2018). Diretiva (UE) 2018/844 do Parlamento Europeu e do Conselho, de 30 de maio de 2018. Jornal Oficial da União Europeia, L 156, 19.6.2018.

União Europeia. (2018). Diretiva (UE) 2018/844. Jornal Oficial da União Europeia, L 156/75, de 19 de junho de 2018.

Williams College. (n.d.). Passive solar design. In *Green building basics*. Recuperado em [2024], de <https://sustainability.williams.edu/green-building-basics/passive-solar-design/>



**Instituto Superior
de Engenharia**

Politécnico de Coimbra