

UNIVERSIDADE DO ALGARVE

FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA

ESTUDO E DESENVOLVIMENTO DE EDIFÍCIOS COM BAIXOS NÍVEIS DE EMISSÕES APLICADO A UM CAMPUS UNIVERSITÁRIO

António Fernando Marques de Sousa

Tese para a obtenção do Grau de Doutor no
Doutoramento Ciências do Mar, da Terra e do
Ambiente, Ramo de Ciências e Tecnologias do
Ambiente, Especialidade Energia

Trabalho efetuado sob a orientação de:

Professor Doutor Eusébio Z. E. Conceição

FARO

2019

UNIVERSIDADE DO ALGARVE

FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA

ESTUDO E DESENVOLVIMENTO DE EDIFÍCIOS COM BAIXOS NÍVEIS DE EMISSÕES APLICADO A UM CAMPUS UNIVERSITÁRIO

António Fernando Marques de Sousa

Tese para a obtenção do Grau de Doutor no
Doutoramento em Ciências do Mar, da Terra e do
Ambiente, Ramo de Ciências e Tecnologias do
Ambiente, Especialidade Energia

Trabalho efetuado sob a orientação de:

Professor Doutor Eusébio Z. E. Conceição

FARO

2019

ESTUDO E DESENVOLVIMENTO DE EDIFÍCIOS COM BAIXOS NÍVEIS DE EMISSÕES APLICADO A UM CAMPUS UNIVERSITÁRIO

Declaração de autoria de trabalho

Declaro ser o autor deste trabalho, que é original e inédito. Autores e trabalhos consultados estão devidamente citados no texto e constam da listagem de referências incluída.

António Fernando Marques de Sousa

© *Copyright*: António Fernando Marques de Sousa.

A Universidade do Algarve tem o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicitar este trabalho através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, de o divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Dedicatória

À memória dos meus pais

À minha esposa e aos meus filhos

Agradecimentos

Expresso os meus sinceros agradecimentos a todos os que contribuíram para a realização deste trabalho.

Um especial agradecimento ao meu tutor, Professor Doutor Eusébio Conceição, pela orientação paciente e constante, disponibilidade, exigência de qualidade, e incentivo nos momentos mais difíceis, que permitiu manter o foco no objetivo final.

Não posso deixar de agradecer também aos meus colegas, Doutor João Gomes, pela ajuda preciosa prestada nas revisões necessárias, e ao meu diretor de departamento, Professor Doutor Jorge Semião, pelo auxílio valioso na organização final deste documento.

Aos Serviços Técnicos da Universidade do Algarve, em especial ao Eng. Gago e ao Eng. Santana, pela informação muito útil fornecida.

“Last but not least”, agradeço ao meu filho mais novo, Eng. Fernando Sousa, pelo apoio prestado na realização deste trabalho.

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito de um projeto financiado pelo Programa Operacional Regional do Algarve (CRESC Algarve 2020), ao abrigo do Acordo de Parceria PORTUGAL 2020, através do Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER), e à Fundação Nacional de Ciência e Tecnologia (FCT).

Resumo

Neste trabalho pretende-se estudar o desenvolvimento de diferentes técnicas que permitam reduzir os níveis de emissões de um conjunto de seis edifícios de um campus universitário, com o objetivo de os aproximar do conceito de NZEB.

Foi realizado um trabalho de carácter numérico, com um programa que determina a resposta dinâmica de edifícios com topologia complexa. Avaliaram-se sete possíveis soluções, nomeadamente, com os sistemas AVAC desligados, com três diferentes sistemas de controlo AVAC de verão e de inverno, e três sistemas com superfícies radiantes alimentados por bombas de calor geotérmicas, de verão, e coletores solares térmicos, de inverno. Foram simulados sistemas de controlo baseados no índice PMV, no índice aPMV e na temperatura preferida dos ocupantes.

A qualidade do ar interior foi avaliada através da concentração de dióxido de carbono no ar, e comparadas as condições de conforto térmico dos ocupantes proporcionadas por todos os sistemas descritos, pela análise da evolução do índice PMV e das horas de desconforto térmico, por frio, por calor, e pela qualidade do ar interior. Foi ainda calculado o consumo de energia associado a cada sistema de controlo AVAC e os resultados comparados em função de dados experimentais disponíveis. Foi estudada a correlação entre consumos e radiação solar incidente nas janelas.

O potencial de produção de energia solar fotovoltaica foi avaliado numericamente, de acordo com as áreas disponíveis nas coberturas dos edifícios, com base nos valores de irradiância solar e de temperatura ambiente e nos parâmetros elétricos dos painéis.

Palavras-chave: conforto térmico, eficiência energética, NZEB, simulação numérica, superfícies radiantes; energias renováveis; sistemas de controlo AVAC.

Abstract

The aim of this work is to study and develop techniques that help reduce the level of emissions of a set of six buildings that are part of a university campus, in order to be closer to the concept of a NZEB. Numerical simulations were performed, with a program that determines the dynamical response of buildings with complex topology.

Seven different situations were evaluated: the passive thermal response of the buildings, with the HVAC systems off; three different HVAC control systems, in winter and summer conditions; and three systems using radiant surfaces, two of them fed by geothermal heat pumps in summer, and one fed by solar thermal collectors in winter. The three HVAC control systems used the PMV index, the aPMV index, and the preferred temperature by the occupants.

The indoor air quality was evaluated regarding the carbon dioxide concentration in the air. The thermal comfort conditions for the occupants were compared for all the above-mentioned systems, by analysing the evolution of the PMV index. The uncomfortable hours by heat and by cold were calculated, as well as the uncomfortable hours due to poor indoor air quality, for all systems under analysis.

The energy consumption associated with each of the HVAC control systems studied was calculated. In order to validate the results, experimental data were used. The correlation between consumption and incident solar radiation was studied.

The potential for electrical energy generation from solar photovoltaic systems was assessed, according to the available areas on the buildings' roofs, based on solar irradiance and ambient temperature data, and on the electrical parameters of the modules.

Keywords: thermal comfort; energy efficiency; NZEB, numerical simulation; radiant surfaces; renewable energies; HVAC control systems.

Índice

1	Introdução.....	1
1.1	Enquadramento geral do trabalho.....	1
1.2	Motivação e objetivos do trabalho	4
2	Revisão bibliográfica	9
2.1	Edifícios de balanço energético nulo ou “Net-zero”	9
2.1.1	Enquadramento histórico	10
2.1.2	Conceito de NZEB e outras definições.....	12
2.1.3	O futuro dos NZEB	26
2.2	Conforto térmico.....	29
2.2.1	Temperatura efetiva e Temperatura Efetiva Standard	30
2.2.2	Temperatura operativa (To)	31
2.2.3	Votação média previsível (PMV).....	32
2.2.4	Percentagem de pessoas insatisfeitas (PPD)	37
2.2.5	Desconforto térmico local	39
2.3	Conforto adaptativo	40
2.4	Modelo da temperatura preferida.....	41
2.5	Qualidade do ar interior em edifícios	43
2.6	Sistemas de controlo dos equipamentos AVAC.....	45
2.6.1	Controlo dos sistemas AVAC pelo índice PMV	46
2.6.2	Controlo dos sistemas AVAC pelo índice aPMV	50
2.6.3	Controlo dos sistemas AVAC pela temperatura preferida	51
2.7	Horas de desconforto térmico e por QAI.....	52
2.8	Simulação numérica de edifícios.....	55
2.8.1	Modelos de cálculo do desempenho energético de edifícios	55
2.8.2	Software de simulação de edifícios	57
2.8.3	Modelo utilizado neste trabalho	57

2.9	Radiação Solar	69
2.10	Aproveitamento da energia solar	71
2.10.1	Sistemas solares térmicos	72
2.10.2	Energia solar fotovoltaica.....	74
2.11	Bombas de calor geotérmicas.....	95
2.11.1	Tipos de sistemas	97
2.11.2	Princípio de funcionamento.....	97
2.11.3	Conceito de COP.....	99
3	Caso de estudo e metodologia aplicada	103
3.1	Caracterização dos edifícios	104
3.2	Metodologia utilizada.....	119
3.2.1	Modelos dos edifícios.....	119
3.2.2	Dados de entrada	120
3.2.3	Sistemas de AVAC e radiantes simulados	125
3.2.4	Bombas de calor geotérmicas e superfícies radiantes.....	128
3.2.5	Análise dos consumos de energia	129
3.2.6	Produção de eletricidade com sistemas fotovoltaicos	136
4	Análise e discussão de resultados	143
4.1	Radiação solar incidente nas janelas	144
4.2	Conforto térmico e qualidade do ar interior	146
4.2.1	Edifício da Escola Superior de Educação e Comunicação (ESEC)	147
4.2.2	Edifício da Escola Superior de Gestão, Hotelaria e Turismo (ESGHT)	151
4.2.3	Edifício nº 1 do Instituto Superior de Engenharia (ISE 1).....	155
4.2.4	Edifício n.º 2 do Instituto Superior de Engenharia (ISE 2).....	159
4.2.5	Edifícios do Complexo Pedagógico (CP)	163
4.2.6	Edifício dos Serviços de Ação Social (SAS).....	167
4.3	Horas de desconforto térmico e QAI.....	172
4.3.1	Horas de desconforto por qualidade do ar interior	172
4.3.2	Horas de desconforto térmico	173
4.4	Consumos de Energia	187
4.4.1	Consumos de energia térmica.....	188
4.4.2	Consumos de energia elétrica	194

4.4.3	Consumos e radiação solar	211
4.5	Produção de energia elétrica com sistemas fotovoltaicos	213
5	Conclusões	219
6	Futuros desenvolvimentos	225
	Referências bibliográficas	227

Índice de figuras

Figura 2.1 – Fronteira local (on-site) para avaliação do balanço energético do edifício (a tracejado).....	20
Figura 2.2 – Índice PPD em função do índice PMV.....	38
Figura 2.3 – Metodologia implementada nos sistemas de controlo PMV e aPMV.....	47
Figura 2.4: Uma das estruturas habituais dos geradores fotovoltaicos, com os módulos fotovoltaicos e os díodos de desvio e de bloqueio, onde se pode observar as ligações em série e em paralelo.	75
Figura 2.5: Curvas características I-V e P-V de uma célula fotovoltaica de silício monocristalino, obtidas a partir do modelo apresentado neste trabalho.....	79
Figura 2.6: Circuito equivalente simplificado, com um díodo.....	84
Figura 2.7: Sistemas de malha fechada vertical, à esquerda, e horizontal, à direita (Kim <i>et al.</i> , 2014).....	97
Figura 2.8: Funcionamento da máquina térmica em processo inverso, como frigorífico ou bomba de calor.....	99
Figura 3.1: Esquema do Campus da Penha, com os edifícios estudados preenchidos a verde (Serviços Técnicos da UAlg).....	105
Figura 3.2: Vista de satélite do Campus da Penha (Google).....	105
Figura 3.3: Edifício da Escola Superior de Educação e Comunicação (ESEC).....	107
Figura 3.4: Estrutura do edifício da Edifício da Escola Superior de Educação e Comunicação.	107
Figura 3.5: Esquema do edifício da ESEC com a numeração dos compartimentos: 1.º piso (à esquerda) e 2.ºpiso (à direita).	108
Figura 3.6: Edifício da Escola Superior de Gestão, Hotelaria e Turismo.....	109
Figura 3.7: Estrutura do edifício da ESGHT.....	109
Figura 3.8: Numeração dos compartimentos do Edifício ESGHT, com o 1.º piso à esquerda e o 2.ºpiso à direita.....	110
Figura 3.9: Edifício n.º1 do Instituto Superior de Engenharia.	111
Figura 3.10: Estrutura do edifício n.º1 do Instituto Superior de Engenharia.....	111
Figura 3.11: Numeração dos compartimentos do edifício n.º1 do Instituto Superior de Engenharia, com o piso 0 à esquerda, o piso n.º1 ao centro e o piso n.º2 à direita.....	112

Figura 3.12: Edifício n.º2 do Instituto Superior de Engenharia.....	113
Figura 3.13: Vista da estrutura do edifício n.º2 do Instituto Superior de Engenharia.	113
Figura 3.14: Numeração dos compartimentos do edifício n.º2 do Instituto Superior de Engenharia.....	114
Figura 3.15: Modelo tridimensional do Complexo Pedagógico, em perspetiva.....	115
Figura 3.16: Estrutura do edifício do Complexo Pedagógico.	115
Figura 3.17: Numeração dos compartimentos do edifício do Complexo Pedagógico, com o piso 0 à esquerda, piso n.º1 ao centro e piso n.º2 à direita.	116
Figura 3.18: Edifício dos Serviços de Ação Social (SAS - antiga Reitoria).....	117
Figura 3.19: Estrutura do Edifício de Serviços de Ação Social.	117
Figura 3.20: Numeração dos compartimentos do Edifício dos Serviços de Ação Social, com o piso 0 à esquerda, piso n.º1 ao centro e piso n.º2 à direita.	118
Figura 3.21 - Colocação dos tubos na superfície radiante.	129
Figura 3.22 - Arquitetura do sistema de captura e armazenamento de dados de consumo dos edifícios do Campus da Penha da Universidade do Algarve.	132
Figura 3.23: (a) Posicionamento relativo dos módulos; (b) Perfil da colocação.....	137
Figura 3.24: Distância entre os grupos de painéis fotovoltaicos escolhida para a instalação.	138
Figura 3.25 - Módulos fotovoltaicos na cobertura do edifício ESEC.....	138
Figura 3.26: Módulos fotovoltaicos na cobertura do edifício ESGHT.	139
Figura 3.27: Módulos fotovoltaicos na cobertura do edifício n.1 do ISE.....	139
Figura 3.28: Módulos fotovoltaicos na cobertura do edifício n.º2 do ISE.	140
Figura 3.29: Módulos fotovoltaicos na cobertura do CP.	140
Figura 3.30: Módulos fotovoltaicos na cobertura do edifício SAS.....	141
Figura 4.1 – Evolução da radiação solar incidente nas janelas, para todos os edifícios analisados, em condições de verão.	145
Figura 4.2 - Evolução da radiação solar incidente nas janelas, para todos os edifícios analisados, em condições de inverno.	145
Figura 4.3 - Evolução da concentração do CO ₂ para a sala 73 (E), do edifício ESEC.	148
Figura 4.4: Evolução do índice PMV em condições de verão na sala 73 do edifício ESEC, para os sistemas AVAC analisados.	148
Figura 4.5: Evolução do índice PMV, de verão, na sala 73 do edifício ESEC, para os sistemas AVAC analisados.....	150
Figura 4.6: Evolução da concentração do CO ₂ para a sala 10 do edifício ESGHT.	152
Figura 4.7: Evolução do índice PMV em condições de verão na sala 10 (O) do edifício ESGHT, para os sistemas AVAC analisados.	152

Figura 4.8: Evolução do índice PMV, de inverno, na sala 10 do edifício ESGHT, para os sistemas AVAC analisados.	154
Figura 4.9 - Evolução da concentração do CO ₂ para a sala 79 do edifício n.º1 do ISE.	155
Figura 4.10: Evolução do índice PMV, de verão, na sala 79 do edifício n.º1 do ISE, para os sistemas AVAC analisados.	156
Figura 4.11: Evolução do índice PMV, de inverno, no edifício n.º1 do ISE, para os sistemas AVAC analisados.	158
Figura 4.12 - Evolução da concentração do CO ₂ para o edifício n.º2 do ISE.	160
Figura 4.13: Evolução do índice PMV na sala 75 (N), de verão, no edifício n.º2 do ISE, para os sistemas AVAC analisados.	160
Figura 4.14: Evolução do índice PMV, de inverno, na sala 75 do edifício n.º2 do ISE, para os sistemas AVAC analisados.	162
Figura 4.15 – Evolução da concentração do CO ₂ para a sala 77 do Complexo Pedagógico.	163
Figura 4.16 – Evolução do índice PMV, de verão, na sala 77 (NE) do Complexo Pedagógico, para os sistemas AVAC analisados.	164
Figura 4.17: Evolução do índice PMV, de inverno, no Complexo Pedagógico, para os sistemas AVAC analisados.	166
Figura 4.18 – Evolução da concentração de CO ₂ para a sala 62 (S), do edifício SAS.	168
Figura 4.19: Evolução do índice PMV, de verão, na sala 62 (S) do edifício SAS, para os sistemas AVAC analisados.	169
Figura 4.20: Evolução do índice PMV, de inverno, na sala 62 (S) do edifício SAS, para os sistemas AVAC analisados.	170
Figura 4.21: Valores de horas de desconforto térmico por calor para o edifício ESEC, no verão.	173
Figura 4.22: Horas de desconforto térmico por frio, no inverno, para o edifício ESEC.	174
Figura 4.23: Horas de desconforto térmico por calor, no verão, para o edifício ESGHT.	175
Figura 4.24: Horas de desconforto térmico por frio para o edifício ESGHT, no inverno.	176
Figura 4.25: Horas de desconforto térmico por calor para o edifício ISE 1, no verão.	177
Figura 4.26: Horas de desconforto térmico por frio para o edifício ISE 1, no inverno.	177
Figura 4.27 – Horas de desconforto térmico por calor para o edifício ISE 2, no verão.	178
Figura 4.28 – Horas de desconforto térmico por frio para o edifício ISE 2, no inverno.	179
Figura 4.29: Horas de desconforto térmico por calor para o edifício ISE 2, no verão.	179

Figura 4.30 – Horas de desconforto térmico por frio para o edifício CP, no inverno...	180
Figura 4.31: Horas de desconforto térmico por frio para o edifício SAS, no verão.	181
Figura 4.32 – Horas de desconforto térmico por frio para o edifício SAS, no inverno.	181
Figura 4.33: Total de horas de desconforto térmico por calor nos edifícios estudados, no verão, com os sistemas de AVAC desligados.	183
Figura 4.34: Total de horas de desconforto térmico por frio nos edifícios estudados, no inverno, com os sistemas de AVAC desligados.	183
Figura 4.35: Total de horas de desconforto térmico, por frio e por calor, nos edifícios estudados, no inverno e no verão, com os sistemas de AVAC desligados. ..	184
Figura 4.36: Total de horas de desconforto térmico por unidade de área dos edifícios, [h/m ²].	185
Figura 4.37: Consumos diários de energia térmica dos edifícios fornecida pelos sistemas AVAC, para o dia de verão, o dia de inverno e o somatório dos dois dias simulados, com os três sistemas de controlo analisados.	193
Figura 4.38: Consumos elétricos diários reais e calculados dos sistemas AVAC do edifício da ESEC, de verão.	196
Figura 4.39: Consumos elétricos diários reais e calculados dos sistemas AVAC do edifício da ESEC, no inverno.	196
Figura 4.40 – Consumos elétricos diários reais e simulados dos sistemas AVAC do edifício ESGHT, no verão.	198
Figura 4.41 – Consumos elétricos diários reais e simulados dos sistemas AVAC do edifício ESGHT, no inverno.	199
Figura 4.42 - Consumos elétricos diários reais e simulados dos sistemas AVAC do edifício nº 1 do ISE, no verão.	200
Figura 4.43 - Consumos elétricos diários reais e simulados dos sistemas AVAC do edifício nº 1 do ISE, no inverno.	201
Figura 4.44 - Consumos elétricos diários reais e simulados dos sistemas AVAC do edifício nº 2 do ISE com EER igual a 3, no verão.	202
Figura 4.45 - Consumos elétricos diários reais e simulados dos sistemas AVAC do edifício nº 2 do ISE, no inverno.	203
Figura 4.46 - Consumos elétricos diários reais e simulados dos sistemas AVAC do edifício CP, no verão.	204
Figura 4.47 - Consumos elétricos diários reais e simulados dos sistemas AVAC do edifício CP, no inverno.	204
Figura 4.48 – Consumos elétricos diários reais e simulados dos sistemas AVAC do edifício dos SAS, no verão.	205
Figura 4.49 – Consumos elétricos diários reais e simulados dos sistemas AVAC do edifício dos SAS, no inverno.	206

Figura 4.50 – Relação entre os consumos diários de energia elétrica reais e os obtidos por simulação, em condições de verão, considerando todos os edifícios e os três sistemas de controlo utilizados.	207
Figura 4.51 – Relação entre os consumos diários de energia elétrica real e obtidos por simulação numérica, em condições de inverno, para todos os edifícios e os três sistemas de controlo utilizados.	208
Figura 4.52 – Relação entre a radiação solar diária incidente nas janelas e o consumo de energia diário obtido por simulação numérica, em condições de verão, considerando todos os edifícios e os três tipos de sistema de controlo utilizados.	212
Figura 4.53 – Relação entre a radiação solar diária incidente nas janelas e o consumo de energia diário obtidos por simulação numérica, em condições de inverno, considerando todos os edifícios e os três tipos de sistema de controlo utilizados.	212
Figura 4.54 – Produção diária de energia elétrica dos sistemas fotovoltaicos (FV) e consumos diários AVAC dos edifícios (AVAC), em condições de verão.	215
Figura 4.55 - Produção diária de energia elétrica dos sistemas fotovoltaicos (FV) e consumos diários AVAC dos edifícios (AVAC), em condições de inverno. ...	216
Figura 4.56 - Comparação entre a produção de energia solar fotovoltaica e os consumos elétricos reais dos edifícios.	217

Índice de tabelas

Tabela 2.1: Valores do coeficiente A em função da velocidade do ar (ISO 7730, 2005).....	31
Tabela 2.2: Escala do índice PMV (ISO 7730, 2005).	32
Tabela 2.3: Grandezas e respetivas unidades associadas ao cálculo do índice PMV (ISO 7730, 2005).	37
Tabela 2.4: Categorias de conforto (ISO 7730, 2005).....	39
Tabela 2.5 – Valores das constantes usadas na simulação	52
Tabela 2.6: Classificação energética para valores de EER e COP para aparelhos do tipo <i>multisplit</i>	101
Tabela 3.1 – Dados das simulações sobre os edifícios em estudo.	118
Tabela 3.2 - Evolução da ocupação dos compartimentos dos edifícios, para as salas apresentadas neste trabalho.	122
Tabela 3.3: Caudais de ventilação aplicados nas salas apresentadas em cada edifício.	123
Tabela 3.4: Matriz de funcionamento dos sistemas AVAC.....	124
Tabela 3.5: Dados técnicos do módulo fotovoltaico.	141
Tabela 4.1 – Radiação solar diária incidente nas janelas [Wh].	144
Tabela 4.2: Energia térmica diária fornecida pelos sistemas AVAC do edifício ESEC [kWh/dia].	189
Tabela 4.3: Energia térmica diária fornecida pelos sistemas AVAC do edifício ESGHT [kWh/dia].	189
Tabela 4.4: Energia térmica diária fornecida pelos sistemas AVAC do edifício n.º1 do ISE [kWh/dia].	190
Tabela 4.5 – Energia térmica diária fornecida pelos sistemas AVAC do edifício n.º 2 do ISE [kWh/dia].	191
Tabela 4.6: Energia térmica diária fornecida pelos sistemas AVAC do edifício CP [kWh/dia].	191
Tabela 4.7: Energia térmica diária fornecida pelos sistemas AVAC do edifício SAS [kWh/dia].	192

Tabela 4.8: Consumos de eletricidade diários dos sistemas AVAC [kWh/dia], para o edifício da ESEC, com os três sistemas de controlo analisados.	195
Tabela 4.9: Consumos elétricos diários dos sistemas AVAC [kWh/dia] para o edifício da ESGHT, com os três sistemas de controlo analisados.	197
Tabela 4.10 – Consumos elétricos diários dos sistemas AVAC [kWh/dia] para o edifício nº1 do ISE, com os três sistemas de controlo analisados, para COP igual a 4 e EER igual a 3.	199
Tabela 4.11 – Consumos elétricos diários dos sistemas AVAC [kWh/dia] para o edifício nº2 do ISE, com os três sistemas de controlo analisados, para COP igual a 4 e EER igual a 3.	201
Tabela 4.12 – Consumos elétricos diários dos sistemas AVAC [kWh/dia] para os edifícios do CP, com os três sistemas de controlo analisados.	203
Tabela 4.13 – Consumos de eletricidade [kWh] diários dos sistemas AVAC para o edifício do SAS, com os três sistemas de controlo analisados, para COP igual a 4 e EER igual a 3.....	205
Tabela 4.14: Áreas disponíveis para os sistemas fotovoltaicos e energia produtível diária, em condições de verão e de inverno, para os edifícios analisados. ...	214

Índice de acrónimos

AVAC – Aquecimento, Ventilação e ar Condicionado.

aPMV – índice de conforto térmico adaptativo, da expressão inglesa *Adaptive Predicted Mean Vote*.

FF – Fator de forma dos módulos fotovoltaicos (em Inglês, *Fill Factor*).

GEO (H) – Sistema de controlo com superfícies horizontais radiantes (tetos e pavimentos) alimentadas por bombas de calor geotérmicas.

GEO (T) – Sistema de controlo com todas as superfícies radiantes (tetos, pavimentos e paredes) alimentadas por bombas de calor geotérmicas.

HR – Humidade relativa, do inglês *Relative Humidity*.

I_{cl} – Índice de vestuário, do inglês *Clothing Index*.

NZEB – Edifícios de balanço energético nulo, do inglês *Net-zero Energy Buildings*.

nZEB – Edifícios de balanço energético aproximadamente nulo, do inglês *Nearly-zero Energy Buildings*.

PD – Percentagem de Insatisfeitos (Percentage of Dissatisfied) com a qualidade do ar interior.

PMV – Índice de conforto térmico definido na ISO 7730, da expressão inglesa *Predicted Mean Vote*, em português Votação Média Previsível.

PPD – Índice de conforto térmico definido na ISO 7730, da expressão inglesa *Predicted Percentage of Dissatisfied*, que indica a percentagem de pessoas insatisfeitas com as condições de conforto térmico.

QAI – Qualidade do Ar Interior, aplicada a edifícios.

TMR – Temperatura Média Radiante.

TP – Sistema de controlo com a temperatura preferida dos ocupantes.

1 Introdução

1.1 Enquadramento geral do trabalho

As transformações a que tem sido sujeito o planeta em que habitamos, devidas às criações humanas, têm sido muito acentuadas, em especial após a Revolução Industrial, e, ainda de forma mais acentuada, no decorrer da mais recente revolução tecnológica.

O nosso modo de vida, baseado na sociedade de consumo, dá origem a produtos poluentes e contaminantes sólidos, líquidos e gasosos, designados vulgarmente de lixos, que são muito lentamente degradados pelos processos naturais. Isto deve-se ao facto de raramente serem biodegradáveis, tendo uma tendência a se acumularem, e alastrarem os seus efeitos por todo o globo, embora de forma assimétrica. Os solos, a atmosfera e os oceanos padecem desta utilização desregrada destes recursos por parte dos seres humanos. Por isso se coloca a difícil questão de manter o conforto civilizacional que nos permite este modo de vida moderno, com o facto de estarmos a esgotar os recursos finitos que o permitem.

A palavra que se impõe é sustentabilidade. Há a necessidade premente e permanente de se buscar ações e processos que se possam afirmar verdadeiramente sustentáveis a longo prazo, caso contrário estaremos a causar a destruição acelerada das condições de vida na Terra. As gerações vindouras poderão não dispor de condições de vida tão aprazíveis como as de que dispomos atualmente, pelo menos nos países mais desenvolvidos. A emissão de gases de efeito de estufa, entre os quais o dióxido de carbono (CO₂) e o metano (CH₄), é atualmente considerada, pela maioria da comunidade científica internacional, como responsável pelo aumento da temperatura média global, fenómeno comumente designado de aquecimento global.

Este fenómeno estará a ocasionar graves alterações climáticas que têm causado secas prolongadas em algumas regiões do globo, enquanto outras sofrem os efeitos de

inundações devido a precipitações invulgarmente intensas, ou furacões de enormes proporções. Tem havido um aumento generalizado das amplitudes térmicas, com mais frequentes picos de calor ou de frio, maior variabilidade do clima, e conseqüentemente mais difícil previsibilidade do tempo.

Os anos mais recentes foram particularmente quentes, e os primeiros meses de 2019 parecem confirmar esta tendência. De acordo com a agência NASA, o ano de 2016 foi o mais quente de sempre, em termos médios, desde que há registos confiáveis. Em agosto de 2015, Portugal encontrou-se na classificação de seca extrema ou severa, em toda a sua extensão territorial, com níveis muito baixos de água nas suas albufeiras e reservatórios de água potável, pondo em risco o abastecimento da agricultura, e, em alguns casos, até o abastecimento das populações. Em 2017, a situação também esteve crítica em muitos concelhos, propiciando a deflagração de incêndios.

Os prejuízos em termos agrícolas foram acentuados em algumas regiões do globo, criando bolsas de refugiados, ainda avolumadas pelas guerras em algumas delas. O avanço das zonas desérticas põe em causa de forma evidente, no futuro, a capacidade de manter a população humana no planeta de forma sustentável. Grandes quantidades de dióxido de carbono são emitidas para a atmosfera pelos setores dos transportes, produção de energia, indústrias e edifícios. Por esta razão, devem ser impulsionadas soluções alternativas à utilização das energias fósseis, e não perder de vista a necessidade urgente de reduzir a pegada ecológica dessas atividades.

A solução passa por dois vetores decisivos, nomeadamente, a eficiência energética e a substituição do uso de fontes de energia fósseis, geradoras de poluição, por fontes limpas, a partir das energias renováveis, como o sol, o vento e a biomassa.

O primeiro vetor é a eficiência energética, ou seja, procurar minimizar o consumo de energia, seja por reduções no consumo doméstico - por vezes com gestos tão simples como o apagar de uma lâmpada quando se deixa um quarto vazio - seja pela otimização da sua utilização, tanto a nível doméstico, como nos processos industriais, pelo contínuo aperfeiçoamento da tecnologia. A eficiência energética deve ser uma preocupação dos decisores políticos e outros *players* do mercado da energia, assim como dos técnicos que projetam, acompanham a implementação, execução e a exploração das obras civis,

assim como das instalações elétricas e mecânicas. Estas instalações podem ser dos diferentes setores da economia, desde o apoio ao sector primário, na satisfação das necessidades de automação da agricultura, passando pelo sector secundário, nas indústrias, e incluindo o sector terciário, nos edifícios comerciais e de serviços.

Pode-se avaliar a importância da redução de consumos no setor dos edifícios de serviços pelos dados da DGE (2008), que indicam que em 2008 os referidos consumos representavam 11,5% do consumo total do país. Revelam ainda uma tendência crescente em relação ao ano de 1990, em que esse consumo representava apenas 6,7% do total de energia consumida no país. De acordo com dados da Agência Internacional de Energia (IEA, 2016), o consumo de energia nos edifícios do setor de serviços, em Portugal, no ano de 2013 representou 12% do consumo nacional de energia. Este dado revela que se manteve, pelo menos até esse ano, a tendência de crescimento da parcela de consumos deste tipo de edifícios em relação ao total nacional. Ainda de acordo com o mesmo documento, enquanto o consumo energético da indústria em 2000 se cifrava em 294 PJ ($8,2 \times 10^4$ GWh), reduzindo-se para 211 PJ ($5,9 \times 10^4$ GWh) em 2013, o setor de serviços viu os seus consumos aumentarem de 54 PJ ($1,5 \times 10^4$ GWh) para 69 PJ ($1,9 \times 10^4$ GWh), no mesmo período, de acordo com o mesmo documento.

No documento emitido por Enerdata (2003), baseado em dados do Eurostat, verifica-se que o valor da poupança alcançada com a melhoria da eficiência energética a nível mundial entre 1971 e 2003, representa, neste para o ano de 2003, um valor ligeiramente superior à energia produzida utilizando o petróleo como fonte primária. Percebe-se facilmente o papel decisivo que a melhoria da eficiência energética tem e terá, no futuro, na redução das emissões nocivas para o ambiente.

Dentre estas instalações, a escolha do presente estudo recaiu nos edifícios escolares universitários, que têm características muito próprias. A grande quantidade de pessoas que os visitam, os horários em que decorre essa utilização e o consumo energético associado é elevado neste sector. O setor dos serviços representa uma fração significativa do consumo total de energia dos países, particularmente dos mais industrializados.

A redução de parte do consumo deste sector representará uma sólida poupança dos recursos energéticos e a redução do impacte ambiental da utilização destes edifícios, além da óbvia poupança financeira das instituições envolvidas. Não se pode também olvidar a criação de novos postos de trabalho, impulsionada pela necessidade dos estudos, projetos, e aplicação das soluções técnicas desenvolvidas e projetadas, com o resultante benefício para a economia do país como um todo, nomeadamente para as áreas científicas e tecnológicas.

O segundo vetor da solução preconizada é a substituição das fontes de energia de origem fóssil como o carvão, o gás natural e os derivados do petróleo pelas fontes renováveis de energia. As fontes fósseis de energia, com tecnologias já plenamente maduras, desenvolvidas em grande parte em períodos do século passado, com pesado investimento público realizado pelas nações, atingiram o ‘mainstream’ e posição dominante e quase absoluta na produção de eletricidade, posição da qual têm vindo gradualmente a perder cota de mercado, devido à aposta nas fontes renováveis, como a solar e a eólica. A redução das importações de combustíveis fósseis dos quais não dispomos, pelo menos em quantidade apreciável, substituindo-as progressivamente por fontes de energia endógenas, permite ainda a diminuição da dependência energética em relação a outros países, reduzindo as necessidades de importação desses combustíveis.

1.2 Motivação e objetivos do trabalho

Este trabalho visa avaliar técnicas que permitam reduzir o saldo de emissões de um conjunto de seis edifícios do Campus da Penha da Universidade do Algarve, reduzindo os seus consumos energéticos e aumentando a produção a partir de fontes de energias renováveis. O objetivo é que se aproximem do conceito de *Zero Energy Building* ou *Net-Zero Building*, um edifício que tem saldo energético nulo. Esta definição é extensível ao “Zero Energy Campus”, que é um objetivo para o qual este trabalho pretende contribuir. Com este propósito, torna-se fundamental produzir energia renovável “in loco”. Isto permitirá reduzir ou anular o saldo entre a energia consumida da rede elétrica ou de

fontes de energia exteriores ao campus, e aquela que se pode gerar no próprio edifício ou área circundante, pela utilização de fontes renováveis de energia.

São avaliados, através de simulações numéricas com software de simulação dinâmica de edifícios, sistemas de controlo dos equipamentos AVAC. Estes sistemas têm como objetivos a melhoria dos níveis de conforto térmico e da qualidade do ar interior dos espaços ocupados nos edifícios, e, simultaneamente, aumentar a eficiência energética dos edifícios. São também simulados sistemas que utilizam energias renováveis, que possam contribuir para o desenvolvimento de edifícios ZEB, mantendo as condições de conforto aceitáveis. Estes sistemas são dotados de superfícies radiantes alimentadas por bombas de calor geotérmicas em condições de verão, e alimentadas por coletores solares térmicos em condições de inverno. De verão, a aplicação de bombas de calor geotérmicas permite arrefecer os espaços interiores, pela utilização de água que circula no solo. De inverno, o aquecimento é obtido com a circulação de água aquecida com a energia resultante da captação da radiação solar.

Será estimada a produção de energia a partir de recursos renováveis, nomeadamente sistemas solares fotovoltaicos, instalados nas coberturas disponíveis dos edifícios, para reduzir o saldo entre a energia produzida e a consumida pelo edifício, em condições de verão e em condições de inverno.

Através do uso do programa de simulação dinâmica de edifícios, será obtida a resposta térmica dos edifícios de topologia complexa. Será avaliada também a qualidade do ar interior dos compartimentos, em que o único parâmetro de estudo será a concentração de dióxido de carbono no ar, presente no interior dos espaços ocupados. Ao todo, serão efetuadas sete diferentes simulações por edifício, a um total de seis edifícios:

1. Sistemas AVAC desligados (resposta passiva do edifício);
2. Sistema AVAC controlado pelo índice PMV;
3. Sistema AVAC controlado pelo índice aPMV;
4. Sistema AVAC controlado pela temperatura preferida;
5. Sistema de superfícies radiantes, horizontais e verticais, alimentadas por bombas de calor geotérmicas, em condições de verão;

6. Sistema de superfícies radiantes horizontais, alimentadas por bombas de calor geotérmicas, em condições de verão;
7. Sistema de superfícies radiantes horizontais, alimentadas por coletores solares térmicos, em condições de inverno.

A primeira simulação corresponde à resposta passiva do edifício, em que as condições de conforto térmico são determinadas exclusivamente pelas suas características arquitetónicas, e pelas propriedades dos materiais que o compõem.

Os casos 2, 3 e 4 correspondem à implementação de sistemas AVAC com controlo inteligente, baseados em três diferentes metodologias e índices de conforto térmico, nomeadamente, o controlo pelo índice de conforto térmico PMV, o controlo pelo índice de conforto térmico adaptativo aPMV, desenvolvido pelos autores, e o controlo pela temperatura preferida, igualmente desenvolvido pelos autores, respetivamente.

Estes três sistemas de controlo pretendem assegurar níveis aceitáveis de conforto térmico aos ocupantes e baixos níveis de consumo de energia dos sistemas AVAC.

Nos casos 5 e 6 são simulados sistemas de superfícies radiantes alimentadas por bombas de calor geotérmicas, em condições de verão, unicamente para realizar a função de arrefecimento, no caso 5 usando apenas as superfícies horizontais (tetos e pavimentos), e no caso 6 acrescentando as superfícies verticais (paredes).

No caso 7 são simulados sistemas com superfícies radiantes alimentadas por coletores solares térmicos, em condições de inverno, somente para realizar a função de aquecimento. Será realizada uma única simulação, utilizando como superfícies radiantes apenas as superfícies horizontais (pavimentos e tetos). Neste caso não será estudada a possibilidade de instalar todas as superfícies radiantes, porque o recurso solar é limitado à área disponível nas coberturas dos edifícios para a instalação dos coletores, calculada pelo programa de simulação numérica.

Para os diferentes sistemas descritos serão realizadas simulações que permitem avaliar e comparar os diferentes sistemas AVAC e os diferentes métodos de controlo utilizados. A comparação será realizada em termos das condições de conforto térmico proporcionadas pelos sistemas AVAC aos ocupantes dos edifícios, e serão analisados e comparados os consumos energéticos resultantes do seu funcionamento. Será estudada

a correlação entre os consumos, a radiação solar incidente nos edifícios e as horas de desconforto térmico dos ocupantes.

Por último, com o objetivo de estudar a possibilidade de produção de energia elétrica a partir da radiação solar, com o uso de sistemas fotovoltaicos, serão utilizados os modelos tridimensionais dos edifícios para neles serem instalados módulos fotovoltaicos, com o propósito de determinar a área disponível para o efeito em cada edifício estudado, e de calcular a capacidade de produção de eletricidade para todos os edifícios, a partir da evolução diária dos valores da irradiância solar e da temperatura ambiente. O valor da energia gerada será então comparado com as necessidades energéticas globais dos edifícios, e em relação ao consumo elétrico correspondente exclusivamente aos sistemas AVAC.

Este trabalho apresenta características próprias, no sentido em que não encontramos na literatura nenhum estudo tão abrangente numa combinação de diferentes aspetos, como o número e complexidade da topologia dos edifícios estudados, a variedade de soluções de eficiência energética, desde os diferentes sistemas de controlo AVAC a sistemas radiantes, a avaliação dos consumos reais e simulados e a previsão da produção de energia elétrica proveniente de sistemas fotovoltaicos. Não se entra em linha de conta com a energia necessária para a iluminação, nem com outros consumos, como o de água, considerando apenas os consumos dos equipamentos AVAC.

2 Revisão bibliográfica

Neste capítulo será apresentada uma revisão da bibliografia dos vários tópicos abordados e utilizados neste trabalho.

Em primeiro lugar é apresentado o tema central do trabalho, o conceito dos edifícios energeticamente eficientes, que englobam várias definições e formas de análise que têm vindo a evoluir ao longo dos anos mais recentes, tanto em termos da sua nomenclatura como dos seus regulamentos. Em seguida é apresentado o tema, seguida do tema do conforto térmico em edifícios, com os diferentes conceitos e abordagens envolvidas, como o modelo de Fanger, o conceito de conforto adaptativo e um terceiro modelo, designado de temperatura preferida. A seguir será abordado o tema da qualidade do ar interior (QAI) em edifícios. No sexto ponto é descrito o procedimento de análise global do desconforto térmico, através do índice ponderado das horas de desconforto térmico. A simulação numérica da resposta térmica dos edifícios e alguns programas informáticos utilizados para esta análise são apresentados no oitavo ponto. Os últimos pontos deste capítulo envolvem os temas da radiação solar e de duas formas do seu aproveitamento, nomeadamente o solar térmico e o solar fotovoltaico, e as bombas de calor geotérmicas.

2.1 Edifícios de balanço energético nulo ou “Net-zero”

Um dos pontos mais importantes deste trabalho, que abarca todos os outros e lhes confere um propósito global, é o tema dos edifícios energeticamente eficientes. Neste caso, combinando a redução de consumos obtida pelo funcionamento mais eficiente

dos sistemas AVAC, com as diversas fontes de energia aproveitadas a partir da estrutura dos próprios edifícios e áreas envolventes, nomeadamente a energia geotérmica e a energia solar, busca-se compensar a energia consumida a partir da rede elétrica de distribuição, tentando atingir um balanço energético nulo, designado geralmente em inglês por “Net-zero”.

Neste subcapítulo será apresentado o conceito de *Net Zero Energy Building* (NZEB) presente na literatura. No ponto 2 será feita uma resenha histórica da evolução da definição do próprio conceito de NZEB, e explicada a dificuldade na sua uniformização, que ocorre devido às diferentes interpretações ou modelos associados a este conceito que foram surgindo. Os pontos mais importantes na especificação dos critérios de definição e avaliação do NZEB serão tratados na terceira parte, juntamente com a enumeração de diferentes conceitos de edifícios eficientes e as definições de alguns termos relacionados com esta temática. O quarto ponto fará uma descrição das metodologias e critérios utilizados para a avaliação dos NZEB, e no quinto e último ponto serão abordadas as suas perspetivas de evolução futura.

2.1.1 Enquadramento histórico

O imperativo da sustentabilidade das ações dos seres humanos na terra também se aplica aos edifícios, que, além de garantirem o conforto, a segurança e a saúde dos seus ocupantes, e de serem estruturalmente robustos, devem ainda ser energeticamente eficientes. Os edifícios produzem cerca de um terço das emissões de GHG (*greenhouse emission gases*), ou gases de efeito de estufa, de acordo com Du Can e Price (2008), e 40 % da energia primária global, nos Estados Unidos e na Europa, assim como 70 % do consumo de eletricidade nos EUA, de acordo com IEA (2018), e 32 % das emissões na UE (EPBD, 2010). Este último documento, a Diretiva Europeia para o Desempenho Energético dos Edifícios (do inglês *European Performance of Buildings Directive*), avalia o potencial de futura redução em 5 a 6 % nos consumos de energia e em 5 % nas emissões, caso se verifique uma maior taxa de renovação dos edifícios existentes de acordo com o novo paradigma de eficiência energética para os edifícios.

Wells *et al.* (2018) apresentam a sua interpretação do histórico da evolução do conceito do NZEB ao longo dos últimos anos, dividindo-a em cinco gerações diferentes, de acordo com as exigências estabelecidas pelas normas regulamentares em relação às características dos edifícios e aos critérios de avaliação. Será apresentado a seguir um breve resumo dessa abordagem.

Primeira geração

Nos anos 90 do século passado, a preocupação crescente com os impactos ambientais negativos fez surgir uma primeira geração de edifícios “verdes” e a criação de planos de certificação energética de acordo com a pegada ecológica, nomeadamente BREEAM (*Building Research Establishment Environmental Assessment Methodology*) e LEED (*Leadership in Energy and Environmental Design*).

Segunda geração

A evolução para a segunda geração resulta da tendência cada vez mais prevalente para a busca da diminuição dos consumos energéticos dos edifícios, já com algumas políticas públicas de apoio, mas ainda relativamente limitadas na sua abrangência. Em 2010, foi criado o conceito de nZEB, da designação inglesa *nearly Zero Energy Building* (Dyrbol *et al.*, 2010) na União Europeia, e foram realizadas alterações nos códigos das edificações, levando às mudanças necessárias nas práticas de construção mais tradicionais. A EPBD já introduz a avaliação de ciclo de vida, ou LCA (*Life-cycle assessment*), com a avaliação dos custos das medidas de aumento da eficiência energética em termos de todo o ciclo de vida do edifício.

Terceira geração

O passo seguinte para o conceito de NZEB é o aumento da utilização dos sistemas solares fotovoltaicos para a produção de energia limpa para compensar os consumos dos edifícios, devido à grande redução dos custos de aquisição dos módulos fotovoltaicos. Esta produção visa compensar as emissões de gases de efeito de estufa da energia gerada a partir de outras fontes.

Quarta geração

A evolução tecnológica já permite nos dias de hoje a instalação adicional de sistemas de acumulação de energia (*storage*) no edifício, em conjunto com uma gestão inteligente de todo o sistema, gerindo não só a geração de energia, mas também o seu consumo. Há a possibilidade de inclusão de estações de carregamento de veículos elétricos, que também pode contribuir para a gestão energética. Esta quarta geração de NZEB consegue atingir o objetivo de alcançar viabilidade económica mais facilmente, mas coloca-se o problema do ainda elevado custo dos sistemas de acumulação com baterias, mas também existem outras soluções de armazenamento de energia muito interessantes, nomeadamente a acumulação de energia na forma térmica, com boas perspetivas de viabilidade técnica e financeira, que tende a ser cada vez mais importante no desempenho energéticos dos edifícios. Entretanto, já ocorreu uma melhor adequação das políticas públicas no sentido de apoiar a aplicação destas tecnologias. Um caso de estudo nesta fase é o que envolve um edifício de dois andares posto em operação na cidade de Berlim em 2013 pelo governo alemão, projetado para ter consumos energéticos inferiores à produção no local de energias renováveis, cujos resultados são apresentados em Ascione *et al.* (2016).

Quinta geração

A quinta geração é a que se prevê em Wells *et al.* (2018), acrescentando a todas as características descritas nas anteriores gerações em termos de eficiência energética, os bairros ou comunidades com Balanço Zero de Energia, ou NZE (do inglês *Net Zero Energy*), o implementar de forma generalizada as tecnologias inteligentes e a Internet das Coisas, a acumulação de energia no local e os edifícios com estratégias regenerativas que criem uma economia partilhada, a consideração da energia incorporada e o estudo cada vez mais cuidadoso do uso da energia e do seu impacto no meio-ambiente.

2.1.2 Conceito de NZEB e outras definições

Neste ponto serão apresentadas as definições mais frequentes para o conceito de NZEB e outros tipos de edifícios relacionados encontradas na literatura. Outros conceitos importantes para a compreensão deste tema também serão definidos, por exemplo a exergia, a energia incorporada nos edifícios e a análise de ciclo de vida.

A definição de NZEB deve incluir a aplicação de medidas de eficiência energética e considerar os seus impactos ambientais, como indicado em Boemi *et al.* (2015) ou em Yi *et al.* (2016). Os edifícios comerciais e residenciais têm vindo a ser objeto de estudo devido à sua importância em termos dos consumos energéticos e correspondentes emissões de gases de efeito de estufa. Surgiu há algum tempo o termo “zero energy” ou “net zero energy”, para identificar edifícios energeticamente eficientes ao ponto de terem um saldo energético nulo. Uma possível definição pode ser a de um edifício que consegue suprir as suas reduzidas necessidades energéticas (obtidas através de ganhos de eficiência) com o uso de energias renováveis, como sugerido em Torcellini *et al.*, (2006).

Deng *et al.* (2014) afirmam que um NZEB pode ser encarado como uma solução integrada para problemas de poupança de energia, proteção ambiental e redução das emissões de CO₂ no setor dos edifícios. As estratégias para se atingir o ZEB podem focar-se no lado da procura ou no lado da oferta de energia, e podem estar ligadas à mudança de combustível e à contabilização da conversão. O conceito de NZEB apresentado por Hyde *et al.* (2012) identifica os objetivos da redução do consumo de energia através da aplicação de medidas de melhoria da eficiência energética e a geração a partir de fontes renováveis para suprir a restante procura.

Um bom design para um ZEB deve valorizar em primeiro lugar a eficiência energética, e só então a geração de energia renovável no local, uma vez que permite reduzir a dimensão do sistema gerador e evitar, se for perfeitamente ajustado, a ligação à rede elétrica ou a necessidade de abastecimento de gás natural ou propano.

Deve-se salientar que, em casos onde existe também fornecimento de gás para aquecimento, ou outra fonte exterior aos edifícios, o valor da energia consumida a partir dessas fontes também deve ser compensado pela produção local para se poder designar de “net-zero”. A ambiguidade do termo levou ao aparecimento de muitas definições diferentes, das quais se pode destacar a de Torcellini *et al.* (2006), num documento do Departamento de Energia dos EUA, que definiu 4 tipos de ZEB em função de determinadas características a ser observadas:

- *Net Zero Site Energy*, que produz pelo menos tanta energia como a que utiliza em termos anuais, quando se contabiliza no site do edifício;

- *Net Zero Source Energy*, que produz pelo menos tanta energia como a que utiliza em termos anuais, quando se contabiliza a fonte. Aqui fonte refere-se à energia primária usada para gerar e entregar a energia ao local. Para calcular toda a energia de fonte do edifício a energia importada e exportada são multiplicadas por fatores de conversão *site-to-source* apropriados;

- *Net Zero Energy Costs*, no qual a quantia paga pela rede ao dono do edifício pela energia por este exportada é pelo menos igual ao valor pago pelo dono ao distribuidor pelos serviços e pela energia usada ao longo do ano;

- *Net Zero Energy Emissions*, que produz pelo menos tanta energia renovável livre de emissões como a energia usada a partir de fontes de energia produtoras de emissões.

A utilização de um dos quatro conceitos em detrimento dos restantes leva a resultados substancialmente diferentes, e cada um destes tipos apresenta vantagens e inconvenientes em relação aos demais. No entanto, esta definição não tem em devida conta o balanço específico entre os objetivos a atingir em fase de construção com o seu design passivo, os da produção de energia com o uso de tecnologias ligadas às fontes renováveis e à gestão do edifício em fase de operação.

Após esta tentativa de sistematização de Torcellini *et al.* (2006), surgiram outras propostas, visando a concretização de diferentes objetivos, para definir edifícios ZEB.

Os conceitos de NZEB então definidos eram o *Nearly zero energy building* (nZEB), um edifício com muito alto desempenho energético, necessidades energéticas nulas ou muito baixas, obtidas a partir de fontes de energias renováveis;

Zero emission building, um edifício com saldo nulo de emissões;

Zero impact Building, um edifício com impacto nulo no ambiente (pode usar vários critérios);

ZEB – Complete, aquele edifício em que todas as emissões de gases de efeito de estufa devem ser compensadas com a geração de energia de fontes renováveis, considerando

todo o ciclo de vida do edifício, desde a fase de produção dos materiais, passando pela construção, operação, e terminando na sua demolição e reciclagem dos materiais.

Nearly Zero Energy Building (nZEB)

A EPBD (2010), Diretiva Europeia sobre a Performance de Edifícios (*European Performance of Buildings Directive*) descreve um nZEB como “um edifício de muito elevada performance, com necessidades energéticas nulas ou muito baixas que devem ser supridas em larga medida com energia proveniente de fontes renováveis, produzida localmente ou nas proximidades”.

Esta diretiva europeia impõe que todos os edifícios públicos construídos após 31 de dezembro de 2018 se enquadrem na definição de nZEB, e alarga essa exigência a todo o restante universo de edifícios novos construídos depois de 31 de dezembro de 2020, apontando a um controlo mais eficiente dos sistemas de AVAC, a uma maior atenção às especificidades do clima, ao posicionamento e à orientação dos edifícios. A qualidade da estratégia de sustentabilidade do projeto do nZEB é verificada através da avaliação de ciclo de vida.

Um Edifício de Impacto Zero (*Zero impact building*) é um edifício que não tem impacto ambiental, baseado numa definição específica de impacto ambiental, que pode ser a quantidade de emissões de gases de efeito de estufa ou a quantidade de carbono. Poderá ser incluído na definição anterior de edifício de impacto zero o que é designado por Edifício de Emissões Zero (*Zero emission building*) e o seu critério de avaliação de impacto é a quantidade de emissões de gases de efeito de estufa.

Um outro conjunto de definições de edifícios de impacto reduzido ou zero está compilado pela ASBEC (*Australian Sustainable Built Environment Council*):

- *Passive house* (Passivhaus Standard - Deutschland), em que o conforto térmico pode ser alcançado apenas por pós-aquecimento ou pós-arrefecimento da massa de ar fresco, sem necessidade de posterior recirculação de ar;

- *Zero emission house (ZEH)*, do *Australian Zero Emission House Project*, um edifício residencial que não produz CO₂ ou outros gases de efeito de estufa para a atmosfera

como resultado direto ou indireto do consumo e utilização de energia na casa ou no local (*on-site*);

- *Zero net carbon*, do *One Planet Living*, aquecido e suprido de energia elétrica com uma combinação de geração de energias renováveis local, e utilizando combustíveis fósseis apenas como reserva (backup);

- *Zero net CO₂ emissions (UK Code for Sustainable Homes)*, em que as emissões de CO₂ anuais da residência [kgCO₂/m²/ano] resultantes do aquecimento e ventilação dos espaços, aquecimento de água, e da utilização dos aparelhos e da preparação das refeições deve ser zero quando calculado de acordo com a metodologia descrita no *Standard Assessment Procedure* (procedimento padrão de avaliação);

- *Zero net emissions (Green Star - Austrália)*, no qual 100 % de redução nas emissões de base em relação a um edifício com um *benchmark* (teste padrão) especificado. Para mais termos e detalhes consultar ASBEC (2011).

Ciclo de vida e energia incorporada

O ciclo de vida de um edifício começa ainda antes da sua utilização, na extração ou colheita das matérias primas, na sua manufatura, transporte, construção e instalação. A energia consumida nestes processos é designada energia incorporada (*embodied energy*). Não é apenas na fase de operação do edifício que há consumo de energia, ocorrendo também nas fases de construção, e manutenção e fim de vida, contribuindo dessa forma para as emissões totais do edifício ao longo da sua vida útil. A iluminação, os sistemas de AVAC e os restantes aparelhos e máquinas são responsáveis pela energia consumida na fase operacional do edifício.

Os trabalhos iniciais dedicados aos edifícios NZEB só avaliavam os consumos operacionais e não contemplavam, em geral, a análise da quantidade de energia incorporada nos edifícios devido à escolha dos materiais utilizados na sua fabricação e construção. Os processos produtivos destes materiais consomem quantidades importantes de energia e o mesmo acontece com o seu transporte e os processos construtivos do próprio edifício (Dixit, 2017). Chastas *et al.* (2016) reveem de forma

abrangente o problema da energia incorporada em edifícios residenciais, que consideram um tema menos exaustivamente tratado na literatura e na aplicação prática. Consideram que é indispensável uma redução tanta na energia consumida em fase de operação como em fase de construção do edifício, estudadas de forma conjunta e visando a redução global da pegada ecológica. Ainda segundo Chastas *et al.* (2016), algumas das medidas frequentemente adotadas para reduzir os consumos operacionais resultam em aumentos da energia incorporada durante a construção e causam uma alteração das proporções geralmente observadas entre elas.

O consumo de energia primária na fase de operação do edifício representa entre 80 a 85 % do total do ciclo de vida (Cabeza *et al.*, 2014), o que leva a maior parte da legislação produzida até ao presente se tenha focado mais nesta fase. Para realizar uma avaliação mais fiável do desempenho ambiental dos edifícios deve ser considerado todo o ciclo de vida.

O Instituto Europeu para o Desempenho dos Edifícios (*Buildings Performance Institute Europe*, BPIE) apresenta de forma resumida em BPIE (2015) o estado da arte das diferentes abordagens e indicadores usados pelos membros da União Europeia e Noruega, no que diz respeito à definição de nZEB para os edifícios novos ou já existentes. De acordo com Hyde *et al.* (2012) a definição de NZEB deveria ser mais estrita no sentido de considerar como objetivo global a erradicação dos poluentes gases de efeito de estufa, o que parece implicar que todos os edifícios devem ser renovados para se adaptarem ao conceito de NZEB.

Outros aspetos a definir envolvem as características desejadas do NZEB são:

- A delimitação da fronteira do ciclo a avaliar, isto é, saber que partes do ciclo de vida do edifício são incluídas ou não no estudo, anual, mensal ou ciclo de vida;
- A delimitação da fronteira espacial a estudar, o edifício apenas, ou incluir a sua vizinhança, cidade ou mesmo região, e a sua vizinhança;
- Os métodos de avaliação e a métrica: por exemplo, realizando o balanço através da energia primária ou das emissões;
- As diferenças entre as tipologias dos edifícios, residenciais ou não;
- O período temporal a ser avaliado no estudo do impacto do edifício;

- Opções permitidas para a redução das emissões;
- Outras exigências como as condições padrão de conforto térmico dos ocupantes ou de eficiência energética.

Metodologia de avaliação e métricas

A variabilidade nas definições do NZEB reflete-se nos diversos procedimentos de cálculo e dos indicadores de impacto utilizados para avaliar a sua sustentabilidade. As grandezas medidas envolvidas nas diversas definições (ASBEC, 2011) são a energia entregue, a energia primária, a quantidade de emissões de gases de efeito de estufa, os custos da energia ou da exergia.

A necessidade de garantir que a produção de energia de fontes renováveis é igual ou superior ao consumo é mencionada em todas as definições apresentadas, mas torna-se importante especificar melhor as condições em que se comparam os consumos e a produção. É indispensável definir uma métrica para o efeito em termos dos períodos temporais a que se aplica, dos tipos de energia a incluir no balanço energético, da infraestrutura da rede local, do controlo do ambiente interior dos edifícios, do potencial disponível para produção de energia renovável e da interação entre a rede e o edifício Kurnitski *et al.* (2011).

Neste ponto, tornam-se fundamentais as ferramentas de simulação numérica, que podem verificar o design passivo e ativo do edifício, e integrar o algoritmo de otimização no cálculo do transiente convencional no consumo de energia. Exemplos deste tipo de programas são o BEOpt/TRNOpt. O ATHENA é uma ferramenta de avaliação do nível de proteção ambiental. Estes tipos de software realizam o que se designa a otimização do desempenho dos edifícios, em inglês BPO (*Building Performance Optimization*).

Avaliação do ciclo de vida

Para realizar o que se denomina por avaliação do ciclo de vida (LCA, do inglês *life cycle assessment*), é imperioso estabelecer as fronteiras de avaliação, isto é, quais as emissões de gases de efeito de estufa que devem ser consideradas: se aquelas causadas antes do uso do edifício (energia incorporada), durante o uso, ou depois da utilização do

edifício, na fase de demolição, de acordo com Berggren *et al.* (2013) e Tumminia *et al.* (2017).

Em UNEP (2010) são descritas as origens das emissões de gases de efeito de estufa que podem ocorrer durante as diferentes fases da existência de um edifício:

- Emissões incorporadas são as que ocorrem antes mesmo da utilização do edifício, e são causadas pelas atividades de extração ou colheita de matérias-primas, manufatura, transporte e construção e instalação do edifício;
- As emissões que ocorrem durante a utilização são de três tipos:
 - As que resultam dos serviços que o edifício deve proporcionar para o seu funcionamento, como o aquecimento e arrefecimento dos espaços interiores, o aquecimento de água e a energia necessária para a cozinha e da iluminação fixa;
 - As resultantes das atividades individuais dos seus ocupantes, como a operação de outros aparelhos e equipamentos (computadores, por exemplo);
 - As provenientes das atividades de renovações do edifício e de transporte;

Após a utilização ocorrem as emissões da desconstrução do edifício, que são causadas no decorrer da sua demolição, em transporte, na reutilização e reciclagem, recuperação de energia (pela combustão de componentes não reciclados) e no seu descarte final.

Período de balanço

O balanço do impacto dos edifícios exige um intervalo temporal bem definido para a sua contabilização, que está associado à escolha da fronteira do ciclo de vida. O período a analisar não está bem estabelecido nos estudos já realizados, com escolhas bastante díspares. Se for escolhido para a análise todo o ciclo de vida do edifício (LCA, do termo inglês *Life Cycle Analysis*), calcula-se o impacto total do edifício geralmente assumindo o valor de 50 anos (ASBEC, 2011). A necessidade de redução da procura de energia elétrica fornecida pela rede pode levar ao uso de períodos mensais ou sazonais, mas Sartori *et al.* (2012), e Carrilho da Graça *et al.* (2011) discutiram as implicações da utilização de períodos mais curtos de análise. A escolha mais frequente recai numa base anual para o balanço das emissões (em especial quando se estudam somente os

consumos durante a operação do edifício) para a maioria dos estudos conduzidos neste tema.

Fronteira física e ligação à rede

Em geral, considera-se que o edifício está ligado às redes energéticas, sejam elas a rede de distribuição elétrica, de gás natural, ou outras. A exceção seria um edifício designado de edifício zero-carbono autónomo (*Autonomous Zero Carbon Building*). A maior parte das definições de NZEB realiza a análise de impacto ambiental dos edifícios no sentido de se obter um balanço nulo em relação à rede, designado por *net zero* (saldo zero com a rede), o que se revela economicamente mais viável do que o balanço em relação ao local, ou *zero site*. No entanto, apesar de a primeira opção utilizar melhor recursos existentes, pode criar problemas à gestão da rede e incentivar o uso de energia gerada a partir de combustíveis fósseis.

Uma das formas mais usadas (e também mais simples) de estabelecer a fronteira a considerar para o cálculo das emissões é a que se pode ver na Figura 2.1, que equaciona a energia fornecida ao edifício pela rede energética à qual se encontra ligado, com o consumo de energia do edifício, a energia proveniente de fontes renováveis gerada no local e eventualmente exportada para a rede (em períodos em que a produção supera o consumo). O balanço energético final é calculado a partir dos valores da energia fornecida e energia exportada.

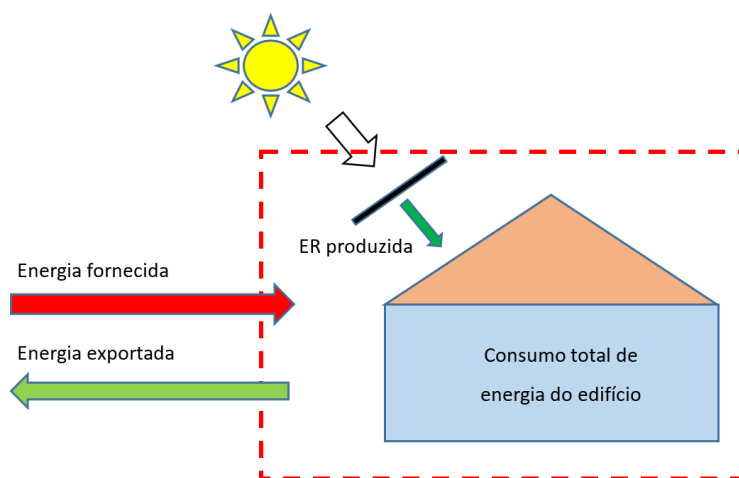


Figura 2.1 – Fronteira local (on-site) para avaliação do balanço energético do edifício (a tracejado).

De acordo com a Figura 2.1, a energia térmica e a energia elétrica fornecida pela rede são dadas por:

$$E_{utilizada,term} = E_{rede,term} - E_{exportada,term} + E_{renovável,term}$$

$$E_{utilizada,el} = E_{rede,el} - E_{exportada,el} + E_{renovável,el}$$

Onde:

- $E_{utilizada}$ – energia total utilizada [kWh/a];
- E_{rede} – energia entregue pela rede *on site* [kWh/a];
- $E_{exportada}$ – energia exportada *on site* [kWh/a];
- $E_{renovável}$ – energia renovável produzida *on site* (sem combustíveis) [kWh/a];

O subscrito ‘*el*’ refere-se à eletricidade e ‘*term*’ à energia térmica.

Uma outra representação de um NZEB onde se podem observar alguns aspetos mais em detalhe está apresentada em Voss e Sartori, (2012).

No entanto, a fronteira de sistema do edifício pode ser uma fronteira virtual, não se limitando ao espaço físico ocupado pelo mesmo, podendo ser consideradas situações em que a produção de energias renováveis é realizada fora deste espaço. A energia pode ser fornecida (vendida) ao edifício a partir de uma central fotovoltaica, por exemplo, e ser contabilizada para o saldo de emissões com sinal positivo, definição de NZEB considerada menos exigente. Outras definições mais complexas das fronteiras para os NZEB podem ser consultadas em REHVA (2013).

A distinção entre o *Zero Energy Building* e o *nearly Zero Energy Building* é feita pela exigência absoluta de um nível de desempenho energético que permita um balanço de consumo de energia não renovável de 0 kWh/m²/ano, enquanto o segundo pode apresentar variações nacionais na sua definição, geradas pelos órgãos políticos de cada país. O nível “próximo de zero” deve balizar a percentagem de cobertura da energia primária pela geração de energias renováveis, os incentivos financeiros colocados à disposição dos investidores para as energias renováveis e o aumento da eficiência energética, o nível de consumo de energia primária que é tecnicamente viável.

Diferenças setoriais

As definições acima descritas podem ser aplicadas a edifícios de todos os setores, residencial, comercial, industrial, e de uso misto. Haverá, sem dúvida, diferenças na implementação das medidas a adotar, decorrentes dos tipos de serviços incorporados nos edifícios incluídos na definição do edifício, nos métodos de modelação e avaliação usados nos diferentes setores (por exemplo, ferramentas de *rating*) e a viabilidade das opções particulares de redução das emissões.

Opções de redução de emissões

Muitas iniciativas para se obter edifícios de baixo impacto qualificam as definições que usam colocando restrições nas opções permissíveis para redução de emissões. O ISF (do Francês *Ingénieurs Sans Frontières*), organização não-governamental de engenheiros fundada em França e mais tarde alargada a outros países, recomenda que as iniciativas voluntárias e regulatórias permitam eficiência energética, soluções de energias limpas *on-site* (apenas no local do edifício) e *off-site* (fora do local do edifício, permitindo a compra de energia a uma central solar fotovoltaica próxima, por exemplo). Contudo, os objetivos específicos ou standards devem ser estabelecidos de modo a assegurar que as opções de eficiência energética e energias renováveis *on-site* tenham a primazia sobre as soluções *off-site*. A viabilidade económica e técnica das opções disponíveis de redução de emissões terá uma importante consideração na preparação destes standards, particularmente para a renovação dos edifícios já existentes.

Requisitos condicionais

Muitas definições incluem requisitos condicionais que devem ser respeitados para se obter um edifício de impacto zero. Podem estar relacionados com a eficiência energética, opções permitidas para a redução de emissões, padrões de conforto, eficiência dos aparelhos e equipamento, limites de custo e *sub-metering* (termo inglês para a medição segregada de determinados grupos de cargas).

Estratégias

As várias estratégias possíveis têm sido analisadas em muitos estudos diferentes. No que concerne uma hierarquia estratégica a seguir, pode-se citar o trabalho de Wells et

al. (2018), que apresenta para o projeto de um NZEB como pontos fundamentais a necessidade de minimizar as cargas do edifício, o uso de estratégias de design passivo do edifício, a implementação e operação de serviços eficientes e o uso de tecnologias de geração a partir de fontes de energias renováveis.

Minimização das cargas

Tendo em vista a redução de consumos, vários trabalhos apresentam estratégias mais específicas, tais como a adoção de equipamentos de aquecimento, ventilação e ar condicionado mais eficientes, em combinação com sistemas de controlo mais inteligentes que também permitam aumentar o potencial de poupanças de energia, este último um dos tópicos principais tratados no presente trabalho. As cargas de iluminação também podem ser reduzidas se forem previstos dispositivos de iluminação natural.

Design passivo

Algumas das medidas de eficiência energética relacionadas com o projeto passivo dos edifícios são:

- A otimização do formato do edifício e da sua correta orientação podem permitir poupanças de mais de 35 % nas necessidades de energia para aquecimento dos espaços Zeiler *et al.* (2016);
- Construir a envolvente com materiais de alto desempenho em termos de isolamento térmico, como indicado em EBC (2014);
- Garantir uma boa estanquicidade da envolvente;
- Uso de dispositivos de sombreamento corretamente desenhados para evitar a excessiva exposição à radiação solar dos espaços interiores, com uma estratégia de otimização da envolvente dos edifícios, nomeadamente, o rácio janela-parede, proposto por Congedo *et al.* (2015).

De modo similar, o consumo total de energia de aquecimento e arrefecimento podia ser reduzido com o uso de sistemas de ventilação natural adequada, oferecendo um amplo caminho para a diminuição do consumo de energia comparado com os métodos de arrefecimento ativos.

Estratégias para alcançar o “net zero energy”

Há duas estratégias mais frequentes para se atingir o consumo com “balanço zero de energia” em edifícios, nomeadamente a minimização do consumo de energia do edifício, e o fornecimento da restante energia necessária através da sua produção via fontes de energias renováveis no local onde o edifício se situa (*on-site*).

Implementação de serviços eficientes

Há diferentes caminhos para a implementação de serviços mais eficientes, sugeridos por diferentes autores, tais como a implementação de tecnologias inteligentes nos sistemas de controlo da gestão dos edifícios (BREEAM, 2016), a melhoria da eficiência das instalações AVAC e dos seus sistemas Brostrom *et al.* (2008), e a necessidade de encorajar os ocupantes a ter comportamentos que resultem em poupanças energéticas.

Geração a partir de energias renováveis

Carrilho da Graça *et al.* (2011) estudaram a viabilidade dos sistemas solares aplicados a um NZEB no clima temperado do sul da Europa (Portugal), inclusive usando os incentivos económicos do enquadramento legal vigente nesse ano, que permitiam obter retornos de investimento bastante rápidos independentemente dos rendimentos dos sistemas solares térmicos ou fotovoltaicos implementados. Nos casos analisados por um estudo da realidade holandesa, da autoria de Zeiler *et al.* (2016), os sistemas de bombas de calor geotérmicas com um aquífero utilizado como armazenamento térmico de energia são os mais frequentes, mas mesmo assim não conseguem cumprir a EPBD (2010). Em Good *et al.* (2015) é realizada uma comparação entre os sistemas solares: térmicos, fotovoltaicos e termofotovoltaicos na sua aplicação aos edifícios eficientes.

Armazenamento de energia (*Storage*) e NZEB autónomo

O conceito de NZEB autónomo envolve maiores restrições do que os modelos anteriores, ao não permitir a alimentação a partir da rede e exigir total autossuficiência. A desconexão da rede de energia, apesar de poder ser uma meta a atingir, geralmente não é viável, porque a intermitência característica da produção de energia solar fotovoltaica não permite assegurar a continuidade de serviço, ou seja, os consumos nem

sempre ocorrem quando há energia disponível (*seasonal mismatch*), de acordo com Carrilho da Graça *et al.* (2011). No entanto, a atual e futura evolução das tecnologias de armazenamento de energia pode alterar o atual *status quo*, abrindo caminho para esse tipo de edifício eficiente (Voss *et al.*, 2010).

Os sistemas atuais de acumulação de energia são implementados com bancos de baterias, com conhecidos inconvenientes em termos do seu impacto ambiental. Os metais perigosos presentes na sua constituição e a dificuldade e elevado custo da sua reciclagem. Outras alternativas em desenvolvimento são: as células de combustível a hidrogénio (*fuel cells*), utilizadas em sistemas de cogeração; o armazenamento hídrico, no qual se aumenta a energia potencial da água pela sua bombagem para um reservatório nos períodos de excesso de produção, visando a possibilidade de voltar a ser turbinada em períodos de ponta ou cheia; ou ainda o armazenamento de energia sob a forma de calor (térmica).

Energia geotérmica

A energia geotérmica como fonte para a produção de eletricidade pode não ser uma escolha óbvia para um único NZEB, mas para uma vizinhança NZEB pode assegurar a disponibilidade para a potência de base de consumo. Esta energia pode ser aproveitada através da utilização de bombas de calor geotérmicas, que apresentam elevados valores de eficiência energética, e que serão abordadas no ponto 2.11. O armazenamento de energia térmica e os sistemas de armazenamento sazonais de energia podem trazer mais equilíbrio entre a geração e a procura, onde a variação sazonal das fontes de energias renováveis é um problema. No caso da sua utilização em fase de construção do edifício, associada a sistemas radiantes aplicados em diversas superfícies do edifício, pode ajudar a manter uma temperatura mais constante nos diversos elementos arquitetónicos (pavimentos, tetos e mesmo paredes), ajudando a reduzir a necessidade de utilização dos sistemas AVAC baseados em condicionamento de ar.

Ajuste de cargas e interação com a rede

O ajuste da carga à geração ou da geração às necessidades de consumo (*load matching*) é uma questão focada na relação entre oferta e procura de energia e é realizada

localmente no edifício, na sua pegada (*footprint*). Não se trata da sua ligação à rede, que é neste caso vista como uma fonte de armazenamento infinito.

Redes Inteligentes (*Smart Grids*)

As redes inteligentes podem ajudar a reduzir os estrangulamentos no trânsito de energia e as flutuações transitórias (Deng et al, 2014). Até mesmo uma eventual sobrecarga do transformador de distribuição em caso de a geração de energia do edifício estar momentaneamente excedente e os edifícios na vizinhança não poderem absorver esse excesso pontual. Pode-se dar o caso de os edifícios vizinhos também disporem de geração própria e terem simultaneamente excedentes de produção.

Os equipamentos necessários para a implementação de uma rede inteligente envolvem medidores inteligentes bidirecionais (*smart meters*), associados a sistemas rápidos de monitorização com protocolos de comunicação atualizados que permitam avaliar e decidir em tempo real as decisões a tomar.

2.1.3 O futuro dos NZEB

Wells *et al.* (2018) preveem que o conceito de NZEB evolua no futuro no sentido de uma abordagem mais holística, tendo em consideração políticas públicas de apoio mais consistentes, a atenção à viabilidade económica, à sustentabilidade ambiental, à energia incorporada nos edifícios e às mudanças climáticas que estão em curso. Os edifícios deverão integrar cada vez mais diferentes tecnologias que vão amadurecendo e cuja utilização se vá tornando mais viável, tais como os veículos elétricos nas suas instalações, sistemas de armazenamento de energia, e a implementação de uma gestão inteligente destes recursos com dispositivos inteligentes (do inglês *smart devices*) naquilo que se designa IoT (do inglês *Internet of Things*) ou Internet das Coisas, Buonomano *et al.* (2016).

Algumas das características das futuras gerações de NZEB poderão incluir a capacidade de ampliação da sua escala, levando à sua integração em bairros de NZEB, como previstos Marique e Reiter (2014). O Centro de Pesquisa em Edifícios de Emissões Zero (*The Research Centre on Zero Emission Buildings, ZEB Centre*), no seu relatório final de

2016 também salienta que os projetos a nível dos edifícios tratados individualmente podem levar à implementação de soluções que não são otimizadas, desperdiçando as sinergias que podem ser obtidas entre geração e utilização com a sua avaliação conjunta, reduzindo as flutuações de carga e suavizando os picos de potência. A ligação em *Smart Grid* pode eliminar a unidade individual de acumulação de energia devido à sua capacidade de ajustar de forma inteligente a energia consumida e a produzida.

O projeto e a implementação dos NZEB requerem equipas multidisciplinares pela multiplicidade de temas a tratar, desde a arquitetura à engenharia civil, eletrotécnica e mecânica e às ciências. Emerge a necessidade de pesquisar e criar melhores e mais económicos materiais, procedimentos mais sustentáveis para a sua produção, para que a energia incorporada nos edifícios seja a menor possível, e cuja reciclagem seja o mais fácil possível, na fase de fim de vida. Na fase de operação, a energia renovável produzida deve ser maior ou igual aos seus reduzidos consumos, sem esquecer que deve garantir com qualidade o conforto dos seus ocupantes. A fase de demolição e reciclagem dos materiais será tanto mais eficiente quanto os materiais e procedimentos usados na sua construção tenham sido corretamente desenvolvidos tendo em conta todo o ciclo de vida útil do edifício.

As questões mais relevantes que se colocam para o futuro dos NZEB envolvem, por um lado, a preparação dos empresários, do mercado e das normas regulamentares para as alterações necessárias ao desenvolvimento dos novos tipos de edifícios eficientes, e por outro lado verificar se os modelos e outras ferramentas de projeto estão suficientemente exatos. Estas condições afiguram-se indispensáveis para assegurar as decisões mais corretas e sustentáveis em todas as fases do processo de criação de novos edifícios.

Em termos de legislação aplicável, estão em curso alterações significativas às normas mais importantes que balizam a eficiência energética em edifícios e que têm vindo a ser preparadas pelos órgãos reguladores de diversos países.

Diretiva EPBD

Na União Europeia, a norma EPBD sofreu importantes alterações e foi publicada neste ano de 2018, no mês de abril. Trata-se de uma revisão da segunda EPBD, de 2010, cuja

primeira versão foi adotada pela Comissão Europeia (2002/91/EC), estabelecendo a obrigação aos Estados-membros de desenvolver, a nível nacional, regulamentações de eficiência energética para os edifícios. A versão de 2010 tinha trazido, entre outras alterações, uma intensificação dos processos de inspeção e da qualidade dos certificados energéticos emitidos, a obrigatoriedade de todos os novos edifícios apresentarem um balanço energético próximo do zero em 2020, e o seu consumo devendo ser coberto por fontes de energia renováveis, a atribuição de uma maior responsabilidade ao sector público, que deve servir de exemplo na aplicação dos regulamentos, e a exigência que os requisitos mínimos se devem ajustar ao princípio da viabilidade económica, ou seja, que sejam consideradas as poupanças nos consumos de energia durante todo o ciclo de vida do edifício.

A nova diretiva (2018) incentiva a eficiência energética e aumentará as poupanças de energia no setor da construção. A diretiva atualiza as regras existentes ao tomar em conta os recentes desenvolvimentos tecnológicos, obrigando a alterações significativas no modo como os edifícios são projetados, visando a melhoria da qualidade dos equipamentos, da envolvente do edifício e um aumento da geração de energia a partir de fontes renováveis. Podem-se destacar, entre as alterações mais importantes introduzidas pela nova diretiva europeia EPBD, em termos de exigências e incentivos, um maior incentivo à eficiência energética no setor da construção, e o reforço da renovação do parque imobiliário da EU. Como novidade, a promoção da mobilidade elétrica, através da instalação obrigatória de um número mínimo de pontos de carregamento de veículos elétricos.

A UE estabeleceu objetivos para a eficiência energética a ser atingidos em 2020 e 2030, com a contribuição da redução dos consumos energéticos dos edifícios. Estes correspondem atualmente a cerca de 40% da energia total consumida. Será necessário definir, por parte dos Estados-Membros, estratégias de renovação a longo prazo para concentrar o investimento na renovação do parque imobiliário. Torna-se indispensável garantir, até 2050, um parque imobiliário altamente eficiente do ponto de vista energético e amplamente descarbonizado.

Nova Norma ASHRAE

Do outro lado do Atlântico, nos EUA, a ASHRAE promoveu modificações no seu standard sobre projeto de edifícios assistido por simulação energética, o ANSI/ASHRAE Standard 209-2018, *Energy Simulation Aided Design for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings*, que vem sendo preparado desde 2011 e que visa “definir procedimentos fiáveis e consistentes que avancem em tempo útil com o uso da modelação de energia para quantificar o impacto de decisões de projeto quando estas estão a ser tomadas”.

Os conceitos relacionados com os NZEB aqui descritos servirão de princípios norteadores da avaliação do desempenho dos edifícios estudados neste trabalho, principalmente no que concerne à utilização de sistemas mais eficientes de AVAC e sistemas radiantes, no sentido da maior eficiência energética, e dos sistemas fotovoltaicos, com o objetivo de produzir energia renovável localmente.

2.2 Conforto térmico

Não sendo de forma alguma o único modo exprimir o conceito de conforto térmico, a norma ISO-7730 (2005) apresenta uma definição bastante apropriada:

- “A condição da mente que expressa satisfação com o ambiente térmico.”

De facto, a sensação de satisfação é muito subjetiva, podendo ser descrita como uma condição mental ou estado de espírito, construído pelo indivíduo a partir de vários fatores extrínsecos e intrínsecos. A diversidade de opiniões e sensações é devida à subjetividade inerente às reações de cada ser humano, que responde de forma diferenciada a estímulos semelhantes, baseado em experiências e hábitos culturais anteriores, nomeadamente no clima habitual em que vive, na sua constituição física, nas suas condições de saúde física e psicológica no momento e no vestuário utilizado, entre outras.

Todos estes fatores desencadeiam reações muito diversas às mesmas condições ambientais, levando à atribuição, pela parte de ocupantes do mesmo espaço, de avaliações do conforto térmico por vezes muito diferentes em termos do frio ou do calor percebidos, nos inquéritos que são realizados para a criação dos índices de conforto.

Os índices de conforto térmico têm vindo a ser desenvolvidos ao longo dos anos por diversos pesquisadores do tema. Inicialmente foram surgindo índices de conforto térmico que se centravam particularmente na temperatura do ar. Mas este parâmetro manifestava-se insuficiente para definir o conforto térmico e outros índices foram sendo apresentados à comunidade científica, como a temperatura efetiva (Houghten e Yaglou, 1923), a temperatura operativa (Winslow, Herrington e Gagge, 1937) e o índice PMV (Fanger, 1970).

2.2.1 Temperatura efetiva e Temperatura Efetiva Standard

Um dos primeiros índices a ser apresentado, desenvolvido por Houghten e Yaglou (1923), é a temperatura efetiva, que é calculada a partir da temperatura de bolbo seco, da temperatura de bolbo húmido e da velocidade do ar. Passou a incluir o efeito da velocidade do ar e da humidade.

O conceito de temperatura efetiva foi posteriormente aperfeiçoado por Bedford (1946), pela inclusão do calor radiante na fórmula do que designou como temperatura efetiva corrigida.

A Temperatura Efetiva Standard (SET) é definida em ASHRAE 55 (2013) como a temperatura de um ambiente imaginário com 50% de humidade relativa, velocidade do ar inferior a 0,1 m/s e temperatura média radiante igual à temperatura ambiente, no qual a perda de calor total pela pele de um ocupante imaginário com a atividade física de 1,0 met e um nível de vestuário de 0,6 clo é o mesmo que uma pessoa no ambiente e com o nível de atividade reais.

2.2.2 Temperatura operativa (To)

A temperatura operativa, T_o , foi introduzida em Gagge (1937) para avaliar um ambiente térmico. É definida na norma ASHRAE 55 (2017) e ISO 7730 (2005) como a temperatura uniforme de um recinto preto imaginário, no qual um ocupante trocava a mesma quantidade de calor por radiação e convecção que no ambiente real não uniforme que o rodeia. A seguinte fórmula, presente em ISO 7730 (2005) permite o seu cálculo:

$$T_o = \frac{h_c \cdot T_a + h_r \cdot TMR}{h_c + h_r} \quad (1)$$

onde:

- h_c é o coeficiente de transferência de calor por convecção, [W/(m²·°C)];
- h_r é o coeficiente de transferência de calor por radiação, [W/(m²·°C)];
- T_a é a temperatura ambiente, [°C];
- TMR é a temperatura média radiante, [°C].

Quando os coeficientes têm valores próximos, a temperatura operativa pode ser determinada de forma simplificada como a média entre a temperatura do ar e a temperatura média radiante, o que ocorre quando a velocidade do ar é inferior a 0,2 m/s e a diferença entre a temperatura ambiente e a temperatura média radiante é menor que 4°C, o que é válido para a maioria das situações práticas. A expressão seguinte define esta aproximação, também apresentada na norma ISO 7730 (2005):

$$T_o \approx \frac{T_a + TMR}{2} \quad (2)$$

Outra fórmula ainda contemplada na mesma norma é:

$$T_o = A \cdot T_a + (1 - A) \cdot TMR \quad (3)$$

onde A é um coeficiente de ponderação que depende da velocidade do ar, cujos valores se apresentam na Tabela 2.1.

Tabela 2.1: Valores do coeficiente A em função da velocidade do ar (ISO 7730, 2005).

U (m/s)	< 0,2	0,2 a 0,6	0,6 a 1,0
A	0,5	0,6	0,7

2.2.3 Votação média previsível (PMV)

O índice que se destaca de todos os outros, pela aceitação que teve entre os seus pares e inclusive por ser inserido na norma ASHRAE 55 (1981) e mais tarde na ISO 7730 (1994), foi desenvolvido por Fanger, conhecido por PMV (*Predicted Mean Vote*, na terminologia em Inglês). O PMV é um índice que se baseia no equilíbrio ou balanço térmico do corpo humano com o ambiente que o rodeia, sendo uma abordagem denominada racional do conceito do conforto térmico.

O corpo está em equilíbrio térmico quando a energia térmica dissipada para o ambiente é igual ao calor produzido internamente através da atividade metabólica. Como o ser humano é fundamentalmente homeotérmico, com a temperatura média corporal geralmente entre 36,1 e 37,8°C (ISO 7730, 2005), o sistema termorregulador tenta automaticamente manter o balanço térmico nulo, pela modificação da temperatura da pele, secreção de suor e outros processos.

De acordo com Fanger (1970) e a EN ISO 7730 (2005) a votação média previsível é a média esperada dos valores votados por um grande grupo de pessoas expostas ao mesmo espaço ambiental, com atividade e vestuário idênticos. Foi criada pela ASHRAE uma escala para ser usada em inquéritos, em que os ocupantes dos espaços escolhem um valor numérico inteiro (voto) entre -3 e +3. O zero significa que a pessoa se sente confortável, em equilíbrio térmico com o ambiente que a rodeia, os valores negativos correspondem a sensações de desconforto térmico por frio e os positivos a desconforto térmico por calor, de acordo com a Tabela 2.2.

Tabela 2.2: Escala do índice PMV (ISO 7730, 2005).

PMV	Condição
+ 3	Muito quente
+ 2	Quente
+ 1	Ligeiramente quente
0	Confortável
- 1	Ligeiramente frio
- 2	Frio
- 3	Muito frio

Estes valores estatísticos dos testes realizados em laboratório serviram para construir as equações que são apresentadas em ISO 7730 (2005) e permitem calcular o índice PMV, de acordo com um conjunto de parâmetros.

O índice de conforto térmico PMV de Fanger engloba seis parâmetros. Quatro desses parâmetros são grandezas relativas ao ambiente que rodeia o indivíduo, nomeadamente:

- A temperatura do ar;
- A velocidade do ar;
- A humidade relativa do ar;
- A temperatura média radiante das superfícies do compartimento.

Os restantes dois parâmetros são grandezas que estão diretamente relacionadas com os ocupantes:

- O nível de atividade física, ou taxa metabólica do indivíduo;
- O nível ou índice de vestuário, que representa a resistência térmica da roupa.

Temperatura do ar (T_a)

O corpo dos ocupantes é rodeado de ar, que se encontra a uma determinada temperatura média, cujo valor influencia as transferências de calor por condução, convecção e evaporação, e que deve ser medida por um processo que elimine a influência da radiação térmica. A sua unidade é o grau Celsius ($^{\circ}\text{C}$). É usado o termómetro de bolbo seco para a sua medição, ou sensores (sondas) de temperatura, evitando que se encontrem em locais sujeitos à humidade e radiação.

Velocidade do ar (U)

Esta grandeza influencia os processos de transferência de calor entre o indivíduo e o ambiente, em especial na convecção mista ou forçada e na evaporação, e deve ser medido o seu valor na zona que será tipicamente ocupada pelo indivíduo. Expressa-se em m/s.

Humidade relativa do ar (HR)

A capacidade do ar para conter vapor de água é limitada e varia com a temperatura. A uma dada temperatura, há uma quantidade máxima de vapor de água que pode estar presente no ar, sem que se produzam condensações. Quando o ar está nestas condições diz-se que está saturado e a humidade relativa é de 100%.

A humidade relativa é a razão entre a quantidade de vapor de água presente no volume de ar considerado e a quantidade máxima de vapor correspondente à saturação, à temperatura a que se encontra, geralmente expressa em percentagem:

$$HR = \frac{p_a}{p_{s,T_a}} \times 100 \quad (4)$$

Onde:

- p_a é a pressão parcial de vapor de água no ar [Pa];
- p_{s,T_a} é a pressão de vapor de água saturado à temperatura T_a , [Pa].

A pressão de vapor de água saturado à temperatura T_a é dada por:

$$p_{s,T_a} = 0,615 e^{\left[\frac{17,27 \cdot T_a}{T_a + 273}\right]} \quad (5)$$

A humidade relativa tem influência nas trocas de calor por evaporação, pelo que a norma ISO 7730 (2005) recomenda que o seu valor esteja próximo dos 50%, mas permite a sua variação na banda de 30 a 70%. Abaixo de 30% pode haver alterações nas vias respiratórias e nas mucosas, e acima de 70%, em tempo quente, pode causar desconforto térmico por não permitir ao corpo dissipar calor por evaporação do suor.

Temperatura média radiante (TMR)

A temperatura média radiante é a temperatura de um compartimento, isotérmico imaginário no qual a troca radiativa de calor é igual àquela que ocorre no ambiente real não uniforme.

As trocas de calor por radiação de um ocupante de um compartimento de um edifício com o ambiente circundante são diferentes em relação às diversas superfícies, porque

as paredes, tetos e pavimentos são constituídos de diferentes materiais, com diferentes emissividades e temperaturas. Além disso, a orientação das superfícies em relação às outras também afeta as trocas radiativas. O fator de forma entre duas superfícies é definido como a fração da radiação que deixa uma superfície e incide na outra diretamente. Este fator independe do tipo de superfície, estando unicamente relacionado com a posição relativa das duas superfícies (Incropera, 2014).

Nível ou índice de vestuário (I_{cl})

O vestuário é uma barreira que aumenta a resistência à transferência de calor por convecção e radiação. Mantém uma camada de ar a uma temperatura próxima da temperatura corporal junto à pele e ajuda a reter a humidade em ambientes secos. A sua resistência térmica depende dos materiais utilizados, da sua área e espessura, e do seu ajuste ao corpo. A unidade utilizada é o “clo”, que representa uma abreviatura da palavra inglesa “clothing”, e foi definida com o valor de $0,155 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$.

Atividade física

O nível de atividade física afeta a taxa metabólica, que resulta na energia térmica emitida pelo corpo humano. A ISO 7730 (2005) utiliza a letra M para representar a taxa metabólica, cuja unidade é W por m^2 de área da superfície corporal do indivíduo, mas define também a unidade “met”, abreviatura de metabolismo, correspondente a $58,15 \text{ W}/\text{m}^2$. A referida norma indica que a fórmula que apresenta para o cálculo do índice PMV é obtida em condições de regime permanente, mas que pode ser aplicada com boa aproximação para pequenas flutuações das variáveis que a integram.

Cálculo do índice PMV

De acordo com a ISO 7730 (2005) o índice PMV é determinado pela seguinte equação:

$$\begin{aligned}
 PMV = & \left(0,303 \cdot e^{-0,036 \cdot M} + 0,028 \right) \\
 & \times \left\{ (M - W) - 3,05 \cdot 10^{-3} [5733 - 6,99(M - W) - p_a] \right. \\
 & - 0,42 [(M - W) - 58,15] \\
 & - 1,7 \cdot 10^{-5} M \cdot (5867 - p_a) \\
 & - 0,0014 M \cdot (34 - T_a) - 3,96 \cdot 10^{-8} f_{cl} \\
 & \left. \times \left[(t_{cl} + 273)^4 - (\bar{t}_r + 273)^4 \right] - f_{cl} \cdot h_c (t_{cl} - t_a) \right\} \quad (6)
 \end{aligned}$$

Onde:

- M é taxa metabólica, [met];
- W é trabalho exterior, considerado nulo para a maioria das atividades, [W/m²];
- p_a é a pressão parcial do vapor de água, [Pa];
- f_{cl} é a razão entre a área superficial do indivíduo quando vestido, com a área quando despido, [-];
- I_{cl} é a resistência térmica do vestuário [m²·°C/W];
- t_{cl} é a temperatura superficial média do vestuário [°C];
- h_c é o coeficiente convectivo de transferência de calor [W/(m² ·°C)];
- \bar{t}_r é a temperatura média radiante, [°C];
- t_a é a temperatura do ar [°C].

A ISO 7730 (2005) também indica equações para calcular os parâmetros t_{cl} , h_c e f_{cl} , e tabelas para consulta dos valores de M e I_{cl} a aplicar em cada caso. De acordo com a ISO 7730 (2005), a equação do índice PMV é válida dentro de determinados limites, para as variáveis que a compõem, que são apresentados na Tabela 2.3.

Tabela 2.3: Grandezas e respetivas unidades associadas ao cálculo do índice PMV (ISO 7730, 2005).

Grandeza	Unidade	Limites	
		Inferior	Superior
Taxa metabólica	met	0,8 (46 W/m ²)	4 (232 W/m ²)
Índice de vestuário	clo	0	2 (0,310 m ² ·°C/W)
Temperatura do ar	°C	10	30
Temperatura média radiante	°C	10	40
Velocidade do ar	m/s	0	1
Humidade relativa do ar	%	30%	50%
Pressão parcial do vapor	Pa	0	2.700

2.2.4 Percentagem de pessoas insatisfeitas (PPD)

O índice PPD, proveniente da expressão em inglês *Predicted Percentage of Dissatisfied*, apresenta a percentagem de pessoas previsivelmente insatisfeitas com um dado espaço ambiental a que estão expostas, e cujo voto manifesta uma insatisfação com as condições térmicas por frio ou por calor. É determinado em função dos valores do índice PMV, sendo uma correlação baseada em estatísticas de voto. A fórmula de cálculo apresentada na ISO 7730 (2005) é a seguinte:

$$PPD = 100 - 95 e^{-(0,03353 \cdot PMV^4 + 0,2179 \cdot PMV^2)} \quad (7)$$

A Figura 2.2 representa um gráfico que relaciona os índices PMV, nas abcissas, e PPD, nas ordenadas, obtido pela equação (7), onde se pode facilmente verificar que o PPD nunca se anula, isto é, não existem condições ambientais que satisfaçam a todas as pessoas simultaneamente. Dito de outra forma, quaisquer que sejam as condições, haverá sempre uma percentagem de pessoas insatisfeitas com o conforto térmico proporcionado. Caso o índice PMV seja zero, a percentagem de pessoas descontentes será de 5%, como se pode verificar no gráfico da Figura 2.2.

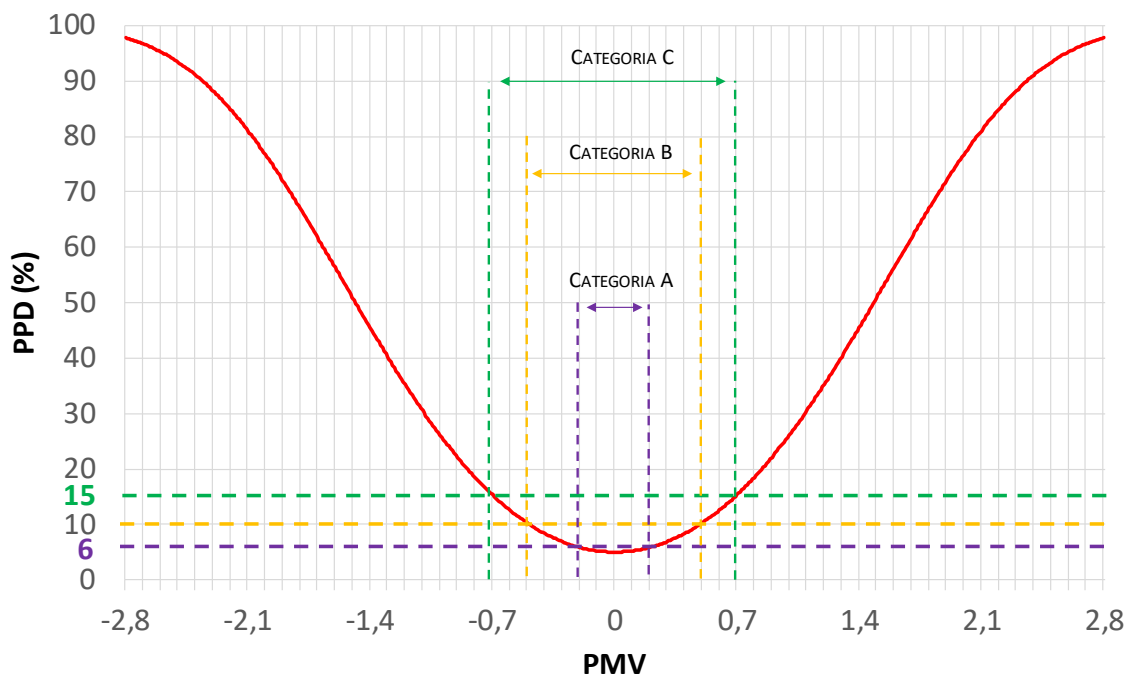


Figura 2.2 – Índice PPD em função do índice PMV.

O índice PMV foi adotado como standard de conforto térmico para as entidades regulamentadoras das atividades ligadas à climatização, em particular a ISO, que elaborou recomendações de conforto para os espaços ocupados, através da criação de três categorias de conforto (ISO 7730, 2005), denominadas categoria A, categoria B e categoria C. Os limites das categorias estão salientados na Figura 2.2, por linhas tracejadas.

A categoria A é a mais estrita e exigente, limitando os valores do índice PMV à banda entre -0,2 e +0,2, correspondendo a uma percentagem de insatisfeitos, PPD, de apenas 6%. A categoria B limita a zona de conforto térmico entre os valores do índice PMV de -0,5 e +0,5, correspondendo a uma percentagem de insatisfeitos de 10%. Os limites definidos pela categoria C da norma ISO 7730 (2005) fazem desta categoria a menos exigente das três, limitando os valores do índice PMV à banda entre -0,7 e +0,7, correspondente a 15% de ocupantes insatisfeitos.

Os limites das diferentes categorias estão expressos na Tabela 2.4.

Tabela 2.4: Categorias de conforto (ISO 7730, 2005).

Categoria	PPD	PMV
A	$\leq 6 \%$	$-0,2 \leq PMV \leq +0,2$
B	$\leq 10 \%$	$-0,5 \leq PMV \leq +0,5$
C	$\leq 15 \%$	$-0,7 \leq PMV \leq +0,7$

O desconforto térmico pode surgir por insuficiência de vestuário e taxas metabólicas muito altas ou muito baixas também podem causar desconforto térmico, mas são variáveis que podem, em geral, ser ajustadas pelos ocupantes dos edifícios.

2.2.5 Desconforto térmico local

O índice PMV baseia-se na noção de equilíbrio térmico e aplica-se a condições ambientais prevalentes no espaço considerado, mas há outras condições de carácter mais localizado que podem causar desconforto térmico aos ocupantes dos espaços. Isto acontece por aquecimento ou arrefecimento excessivo de uma parte do corpo. Este desconforto térmico local pode ser causado por diversas situações, entre as quais:

- Exposição assimétrica à radiação;
- Risco de resfriamento;
- Gradientes elevados de temperatura na vertical (estratificação térmica);
- Contacto com pisos demasiado frios ou demasiado quentes.

A sensibilidade ao desconforto térmico local é menor quando a pessoa estiver a desenvolver uma atividade física mais intensa (taxa metabólica mais elevada) ou tiver um nível de vestuário mais elevado.

A exposição assimétrica à radiação ocorre quando o campo de radiação térmica em torno do corpo não é uniforme, quer devido às trocas de calor com as superfícies circundantes frias ou quentes, quer devido à radiação solar diretamente incidente. Pode

ocorrer na direção vertical ou na direção horizontal e provocar desconforto térmico local. A sensibilidade a este fenómeno é menor, de modo geral, quando é causado por paredes (superfícies verticais) quentes ou frias do que aqueles que resultam de tetos quentes.

O risco de resfriamento, do inglês “draught risk”, que depende da velocidade do ar, da temperatura do ar e da intensidade de turbulência do ar, é causado pelo aumento do fenómeno convectivo e pode provocar desconforto térmico local. É definido como arrefecimento local indesejado do corpo causado pelo movimento do ar, e é mais frequente quando a sensação térmica de todo o corpo é ligeiramente fria (abaixo do neutro).

O gradiente de temperatura na vertical está associado à diferença de temperatura do ar entre o nível dos pés e o nível da cabeça e pode provocar desconforto térmico local. O contacto com as superfícies dos pavimentos demasiado quentes ou frios também pode provocar desconforto térmico local.

Para representar a percentagem previsível de pessoas insatisfeitas por desconforto térmico local, devido a resfriamento ou outras fontes foi escolhida a sigla PD (“Percentage Dissatisfied”), e os seus valores não devem ultrapassar os limites estabelecidos nas normas ASHRAE 55 (2017) e ISO 7730 (2005).

2.3 Conforto adaptativo

A metodologia do índice PMV no estudo do conforto térmico humano foi revelando algumas lacunas na sua aplicação prática, pelo que foram surgindo, em contraponto à abordagem do modelo do balanço térmico que sustenta o índice PMV, diferentes abordagens ao conceito de conforto térmico, designadas de modelos adaptativos. Enquanto o modelo do balanço térmico se baseou em estudos laboratoriais, os modelos adaptativos baseiam-se em estudos de campo (Dear *et al.*, 1997).

O conceito de conforto térmico adaptativo baseia-se no princípio de que quando ocorrem alterações nas condições ambientais que geram desconforto térmico as

peças reagem de formas que tendem a restaurar o seu conforto, como referido em de Dear *et al.* (1997), de Dear e Bragger (2001), Nicol *et al.* (2002), Nakano e Tanabe (2003), Nicol, F. (2004), Nicol F. (2006) e Van der Linden *et al.* (2006).

Alguns autores referem que o modelo baseado no balanço térmico sobrestima as respostas dos ocupantes em condições de altas temperaturas, e subestima-as para as baixas temperaturas (De Dear 1998). Brager e de Dear (1998) consideram que os modelos adaptativo e do balanço térmico podem ser complementares e não contraditórios. Eventualmente, um modelo que combine as características destas duas abordagens será capaz de avaliar corretamente a resposta dos ocupantes dos edifícios reais, ao considerar as influências térmicas e não térmicas presentes.

O conforto térmico adaptativo considera, além dos parâmetros englobados no índice PMV, os valores da temperatura exterior.

2.4 Modelo da temperatura preferida

Este sistema de controlo é baseado nos métodos atualmente utilizados nos sistemas de AVAC, que controlam a temperatura. Neste caso, existe uma equação de temperatura preferida para cada época do ano, à semelhança do que sucede no conforto adaptativo. A temperatura de controlo do sistema AVAC é calculada em função da temperatura exterior.

Graças à sua localização no extremo sul de Portugal, a região do Algarve goza de condições climáticas amenas, com níveis de radiação solar moderados e temperaturas moderadas no inverno, e elevados níveis de radiação solar e altas temperaturas no verão, embora não tão altas como em regiões mais interiores do país. Torna-se assim necessária a utilização de sistemas de ar condicionado no verão para o arrefecimento e, em geral, a potência necessária para aquecimento é moderada. Utilizando índices de vestuário moderados ao longo do ano, os estudantes universitários usam os sistemas de aquecimento, ventilação e ar condicionado para assegurar condições térmicas aceitáveis.

As temperaturas ambientais preferidas no interior dos compartimentos são definidas em função das condições externas aos edifícios e dos níveis de vestuário, que são, em geral, modificados pelos docentes e alunos para se adaptarem à variação das condições de conforto térmico interiores, mesmo durante as atividades letivas. As temperaturas preferidas do ar, de acordo com as outras variáveis, nomeadamente a velocidade do ar, a temperatura média radiante e a humidade relativa do ar, são usadas para avaliar as condições globais de conforto térmico.

Um estudo sobre a temperatura preferida do ar foi realizado por Conceição *et al.* (2009) num edifício escolar, localizado no Algarve, sul de Portugal, com estudantes entre os 10 e os 15 anos. Neste estudo, foi desenvolvido o modelo empírico que incorpora a temperatura preferida para o ambiente interior, a temperatura ambiental exterior e a adaptação dos ocupantes às diferentes estações do ano e aos diversos espaços.

Os tipos de compartimentos existentes incluem gabinetes, sala de professores, secretaria e biblioteca e salas de aula, sendo ocupados pelos alunos e por pessoal docente e não docente. Todos os espaços são equipados com sistemas AVAC e os seus ocupantes podem alterar a temperatura interior preferida para obter condições de conforto térmico que considerem aceitáveis.

O modelo empírico baseia-se num conjunto de equações para os diferentes meses e para os diversos espaços que fornece a informação necessária para ser utilizada no controlo dos sistemas AVAC, em edifícios escolares, em clima tipicamente mediterrâneo, e é desenvolvida a sua formulação no ponto 2.6.3.

Relacionados com este assunto, podem ser analisados outros trabalhos em Kolokotsa *et al.* (2011), Quang (2013), Quang *et al.* (2014) e Rodrigues *et al.* (2010). O trabalho de Kolokotsa *et al.* (2011) é sobre edifícios inteligentes *net-zero* (ZEB) e *positive-energy* (com saldo positivo de energia). Quang (2013) e Quang *et al.* (2014) analisam a qualidade ambiental interior e o consumo de energia e Rodrigues *et al.* (2010) avalia o conforto térmico em bibliotecas de edifícios escolares.

2.5 Qualidade do ar interior em edifícios

A sensação de conforto dos ocupantes dos edifícios não pode ser restrita apenas ao conforto térmico, apresentado no ponto 2.2. Os seres humanos necessitam de um ambiente que lhes proporcione ar de boa qualidade para respirarem, para se sentirem confortáveis e também para conservarem a sua saúde.

Por isso, é também necessário avaliar a qualidade do ar interior dos edifícios, normalmente representado nas normas portuguesas por QAI. Uma das normas importantes é a publicada na Portaria n.º 353-A/2013, cujo anexo é o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços (RECS, 2013), que apresenta os requisitos de ventilação e qualidade do ar interior. O RECS (2013) estipula que os edifícios de comércio e serviços, nos quais se incluem os estudados no presente trabalho, “devem ser dotados de soluções para ventilação por meios naturais, meios mecânicos ou uma combinação de ambos”. Em termos internacionais uma importante norma sobre ventilação em edifícios é a ASHRAE (2010b).

Os sistemas AVAC devem ser responsáveis por remover todos os poluentes presentes nos compartimentos, quer sejam libertados pelas pessoas, como o dióxido de carbono expirado, pelos materiais que compõem as superfícies dos pavimentos, tetos, paredes, e mobiliário, e ainda produtos cuja libertação decorre da utilização de laboratórios químicos, salas de computadores, entre outros (Viegas, 2000).

Para determinadas situações, especialmente em ambiente industrial ou em zonas de elevada poluição do ar atmosférico, é por vezes necessário considerar os poluentes exteriores ao edifício e dotar os sistemas de climatização de capacidade de limpeza do ar exterior antes da sua introdução nos espaços ocupados. Os processos de ventilação que suprem o ar novo necessário aos utilizadores dos compartimentos podem ser quantificados por grandezas como a taxa de renovação do ar, a idade do ar e a eficiência do sistema de climatização.

A taxa de renovação do ar, expressa em $[h^{-1}]$, é definida como o número de vezes que o ar de um compartimento fechado é substituído por ar proveniente do exterior, num intervalo de tempo de uma hora.

O número de renovações do ar num determinado compartimento é dado pela razão entre o caudal volúmico de ar que nele entra e o volume efetivo do compartimento, quando existe uma mistura perfeita no compartimento, de acordo com a seguinte expressão:

$$n = 3600 \cdot \frac{Q}{V} \quad (8)$$

Onde

- n é o número de renovações do ar numa hora [h^{-1}];
- Q é o caudal volúmico do ar que entra [m^3/s];
- V é o volume efetivo do compartimento [m^3];

O caudal volúmico de renovação do ar é o fluxo de ar através dos limites ou fronteiras do compartimento em causa.

Para avaliar a qualidade do ar foram desenvolvidos diversos métodos para a medição da taxa de renovação do ar e das outras grandezas acima descritas, com o intuito da avaliação da qualidade do ar interior. Uma das técnicas mais usadas é o método dos gases traçadores. Esta técnica consiste em introduzir um gás no compartimento e através dele seguir o movimento do ar. O gás a ser utilizado para esta função deve ter muito baixas ou nulas concentrações na atmosfera, não pode ser tóxico nem inflamável, nem ter efeitos nocivos para a saúde. Além disso, não deve ser facilmente absorvido pelas superfícies do compartimento ou pelos objetos aí presentes, devendo ser inodoro e incolor. A sua massa específica deve ser próxima da do ar, ou da massa específica do poluente que simula.

Sendo um produto de excreção resultante do catabolismo humano (parte do metabolismo em que se produz energia a partir de moléculas de nutrientes), o dióxido de carbono é o produto libertado em maior quantidade e a sua emissão é proporcional ao nível metabólico. Não tem efeito pernicioso para a saúde, desde que a sua concentração não atinja valores elevados, passando a causar mal-estar. Por este motivo, a sua concentração máxima nos compartimentos dos edifícios, de acordo com o RECS (2013), é de $2250 \text{ mg}/\text{m}^3$, que equivale a 1250 ppm (partes por milhão).

Para avaliar a insatisfação dos ocupantes com a qualidade do ar interior será usada a expressão apresentada no relatório da EUR 14449 EN (1992), que calcula a percentagem de pessoas insatisfeitas, PD, proveniente do inglês *People Dissatisfied*, em função da concentração de dióxido de carbono, C_{CO_2} :

$$PD = 395 \cdot e^{-15,15 \cdot C_{CO_2}^{-0,25}} \quad (9)$$

em que a concentração de CO_2 deve ser expressa em partes por milhão.

A avaliação da QAI (qualidade do ar interior) é geralmente realizada pela medição da concentração de dióxido de carbono, porque este gás permite obter uma boa indicação do valor do caudal volúmico de renovação do ar (Levine *et al.*, 1993), e é um bom indicador da poluição de modo geral, podendo ser usado como gás traçador. O dióxido de carbono apresenta vantagens, devido ao facto de ser produzido pelos próprios ocupantes e o seu custo ser quase desprezável. A principal desvantagem manifesta-se quando existem outras fontes de carga poluente de dióxido de carbono além dos ocupantes, dificultando a quantificação das suas fontes de emissão.

2.6 Sistemas de controlo dos equipamentos AVAC

Nesta secção serão apresentados os três diferentes métodos aplicados aos sistemas de controlo dos equipamentos AVAC que serão objeto de análise detalhada no capítulo 4. O controlo dos sistemas AVAC será realizado pelo índice PMV, pelo índice aPMV, e pela temperatura preferida.

2.6.1 Controlo dos sistemas AVAC pelo índice PMV

Neste ponto será descrito o sistema de controlo AVAC baseado no índice PMV (Conceição *et al.*, 2012b).

A metodologia implementada neste trabalho está representada na Figura 2.3, sendo idêntica à utilizada para o item seguinte, no qual o sistema é controlado pelo índice aPMV. Os acrónimos presentes na figura representam as seguintes variáveis, provenientes das suas designações em língua inglesa:

- RH é a humidade relativa do ar (*relative humidity*);
- T é a temperatura do ar (*temperature*);
- D_{air} é a densidade do ar (*air density*);
- V_{air} é a velocidade do ar (*air velocity*);
- I_{cl} é o índice de vestuário (*clothing index*);
- M é a taxa metabólica da pessoa;
- MRT é a temperatura média radiante (*mean radiant temperature*).

Os subíndices *in* representam as variáveis interiores do edifício e os subíndices *out* referem-se às variáveis exteriores.

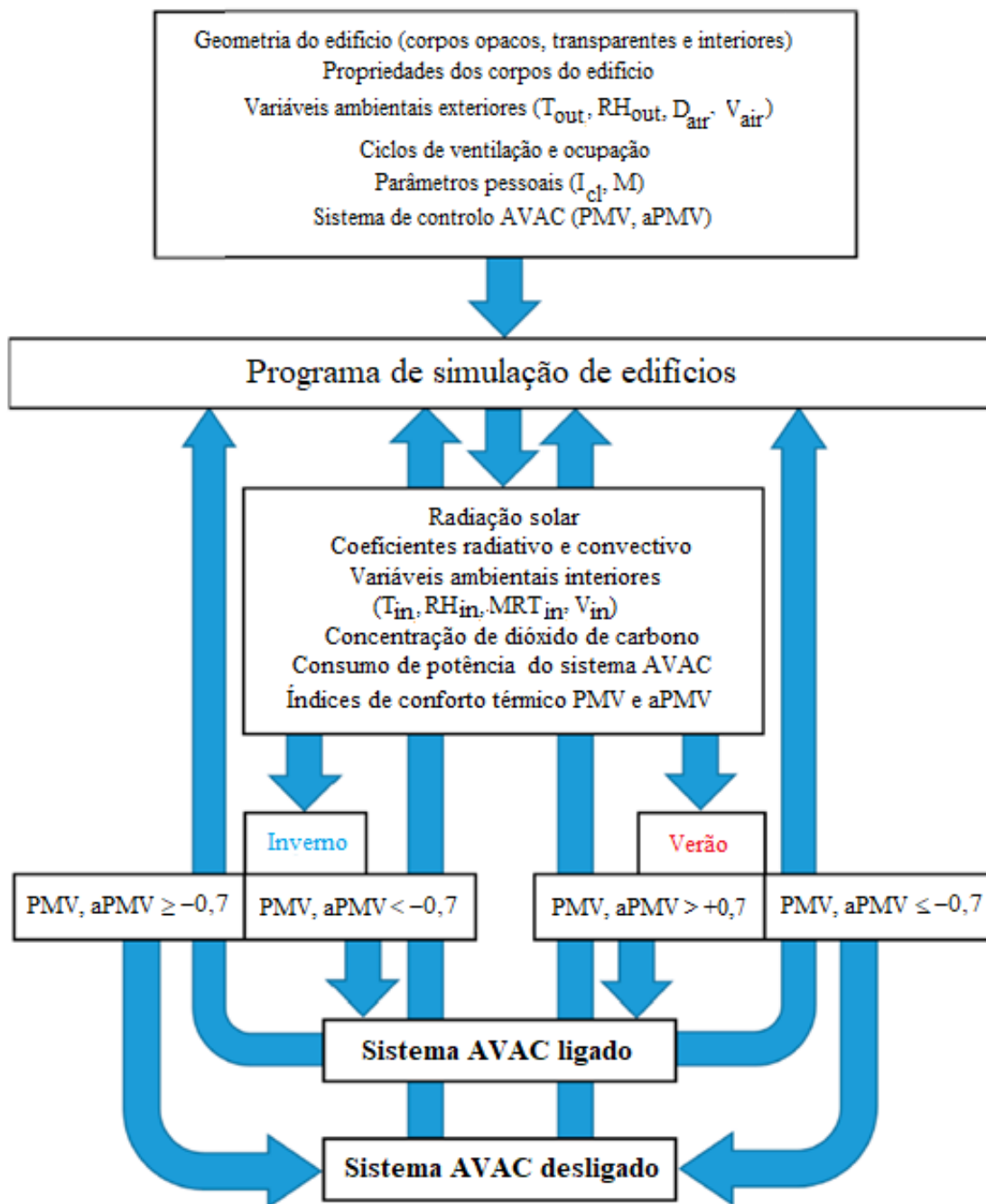


Figura 2.3 – Metodologia implementada nos sistemas de controlo PMV e aPMV.

O cálculo da potência de arrefecimento do sistema de AVAC em condições de verão é efetuado, para um dado instante, através das seguintes equações:

$$\begin{cases} Q = 0; & \text{para } 0 < PMV < 0,7 \\ Q = -Q_{\max} \cdot \frac{PMV}{0,7} + Q_{\max}; & \text{para } 0,7 \leq PMV \leq 1,4 \\ Q = -Q_{\max}; & \text{para } PMV > 1,4 \end{cases} \quad (10)$$

Onde:

- Q é a potência de atuação do sistema de AVAC num dado momento, [W];
- $(-Q_{\max})$ é a máxima potência de arrefecimento do sistema de AVAC, [W];
- PMV é o valor do índice de conforto térmico de Fanger calculado no intervalo de tempo anterior, utilizando para o seu cálculo a metodologia presente na ISO 7730 (2005), [-].

De verão o sistema só entra em funcionamento para valores do índice PMV maiores que +0,7 e aumenta a potência de arrefecimento de forma linear com o crescimento do índice PMV. No entanto, para o valor de PMV de 1,4 é atingida a potência máxima do sistema AVAC, e para valores superiores a potência permanece constante e igual a $-Q_{\max}$.

Durante o inverno, a potência de aquecimento é determinada pelas equações seguintes:

$$\begin{cases} Q = Q_{\max}; & \text{para } PMV < -1,4 \\ Q = -Q_{\max} \cdot \frac{PMV}{0,7} - Q_{\max}; & \text{para } -1,4 \leq PMV \leq -0,7 \\ Q = 0; & \text{para } -0,7 < PMV < 0 \end{cases} \quad (11)$$

Onde:

- Q é a potência de atuação do sistema AVAC num dado momento, [W];
- Q_{\max} corresponde à máxima potência de aquecimento do sistema de AVAC, [W];
- PMV é o valor do índice PMV, calculado no intervalo de tempo anterior, [-].

De inverno, o sistema só funciona para valores do índice PMV inferiores a -0,7 e aumenta a potência de aquecimento de forma diretamente proporcional à diminuição do índice PMV. Para valores inferiores a -1,4, em que é atingida a potência nominal do sistema AVAC, a potência mantém-se constante e igual a Q_{max} .

Esta estratégia tem como objetivo a obtenção de níveis de conforto em que o índice PMV se mantenha entre - 0,7 e + 0,7. Desta forma, os valores do índice PMV respeitam os limites estipulados na Categoria C descrita na Norma ISO 7730 (2005), garantindo que haja uma percentagem inferior a 15% de ocupantes insatisfeitos com as condições de conforto disponíveis no compartimento. O sistema procura manter o índice PMV o mais próximo possível de +0,7 e de -0,7, de verão e de inverno, respetivamente, resultando em consumos mais moderados.

Os sistemas mais clássicos de ar condicionado são baseados no controlo da temperatura do ar interior do espaço a climatizar, pelo que dispõem de um sensor para monitorizar o seu valor. O índice PMV engloba outros parâmetros, que também devem ser medidos, pelo que necessita de um sensor de temperatura do ar e um sensor de humidade relativa do ar, que devem ser colocados em cada sala, a diferentes alturas. A temperatura do ar será a média das temperaturas ao nível do tornozelo, da cintura e da cabeça, que são 0,1 m, 0,6 m e 1,1 m, respetivamente, para ocupantes sentados e 0,1 m, 1,1 m, e 1,7 m para ocupantes em pé (ASHRAE 55, 2017). A medida da temperatura média radiante pode ser realizada com o auxílio de um termómetro de globo negro, mas este procedimento pode ser substituído pelo cálculo da média das temperaturas medidas no teto e paredes circundantes por uma sonda superficial, ou usando o valor da superfície do teto. A velocidade do ar em torno do indivíduo é estimada em função do caudal de ventilação predefinido, podendo também ser obtida a partir de ensaios experimentais, ou com o recurso a um programa de Dinâmica de Fluidos Computacional (do inglês *Computer Fluid Dynamics*), ou CFD.

Os parâmetros de natureza individual, nomeadamente o nível de atividade física e o nível de vestuário, são predefinidos pelo programa, tal como se explica no ponto 3.2.2.

2.6.2 Controlo dos sistemas AVAC pelo índice aPMV

Este algoritmo é desenvolvido de forma semelhante ao do sistema de controlo pelo índice PMV, mas o índice aPMV substitui o PMV nas equações descritas no ponto 2.6.1.

O índice aPMV é calculado a partir do índice PMV, com a aplicação de um coeficiente dito adaptativo, proposto em Yao *et al.* (2009), Yao *et al.* (2010), Singh *et al.* (2011) e Gomes (2016). O fator de correção é obtido matematicamente, pela relação entre os valores experimentais, dados pelo índice AMV (Yao *et al.*, 2009) e os valores obtidos em laboratório por Fanger (índice PMV). Este fator de correção é calculado para cada valor da temperatura exterior, e representado pela letra λ .

A equação que permite calcular o índice aPMV, a partir do índice PMV, apresentada em Yao *et al.* (2009), é a seguinte:

$$aPMV = \frac{PMV}{1 + \lambda \cdot PMV} \quad (12)$$

Onde

- aPMV é o índice PMV adaptativo, [-];
- PMV é o índice de conforto térmico de Fanger, [-];
- λ é o coeficiente adaptativo de correção, [-].

Este coeficiente foi determinado a partir de estudos experimentais, onde se monitorizavam as variáveis ambientais e se realizava o preenchimento, por parte dos sujeitos, de um conjunto de questionários subjetivos. Os valores de λ aplicados neste trabalho foram calculados em Gomes (2016), em condições ambientais de verão e em condições ambientais de inverno, num estudo realizado para um edifício universitário, obtendo-se a seguinte equação:

$$\lambda = 0,1193 \cdot T_{ext} - 2,4984 \quad (13)$$

Onde T_{ext} é a temperatura do ar exterior.

Já tinha sido realizado um trabalho similar para um jardim de infância no sul de Portugal em Conceição *et al.* (2012) e em Gomes (2016) para outros tipos de edifícios escolares.

Para a implementação prática deste modelo numérico para o índice aPMV, torna-se necessário um sensor para medir a temperatura exterior, além dos que são necessários para o sistema de controlo do índice PMV.

2.6.3 Controlo dos sistemas AVAC pela temperatura preferida

É utilizado um modelo numérico complexo que simula o comportamento térmico do edifício. Neste modelo é utilizada a temperatura empiricamente preferida do ar interior para obter o desempenho térmico real.

O modelo numérico, desenvolvido para uma sala de aula típica e um gabinete típico de um edifício universitário, apresenta a temperatura do ar interior preferida dos ocupantes (T_{in}), como função da temperatura do ar exterior (T_{out}), para os quatro trimestres do ano, como uma relação linear. Esta relação é mostrada na equação (11), que é utilizada nestes modelos empíricos, na forma seguinte:

$$T_{in} = a \cdot T_{out} + b \quad (14)$$

Com:

$$c < T_{out} [^{\circ}\text{C}] < d \quad (15)$$

Onde:

- T_{in} é a temperatura do ar interior [$^{\circ}\text{C}$];
- T_{out} é a temperatura do ar exterior [$^{\circ}\text{C}$];
- a é o declive da equação linear empírica [-];
- b é a constante da equação linear empírica [$^{\circ}\text{C}$];
- c é o limite inferior da temperatura do ar medida [$^{\circ}\text{C}$];
- d é o limite superior da temperatura do ar medida [$^{\circ}\text{C}$].

Na equação (14) estão estabelecidos os valores máximo e mínimo medidos da temperatura do ar. A implementação prática deste modelo numérico para a temperatura preferida exige sensores para medir a temperatura exterior. O cálculo da temperatura interior, em função da temperatura exterior, é realizado utilizando a equação linear (13), e um dispositivo eletrónico calcula o valor da temperatura interior

preferida pelos ocupantes, em cada passo do programa. O desenvolvimento deste trabalho, e os valores das constantes determinadas podem ser consultadas em Conceição *et al.* (2009). Os valores utilizados para as constantes foram os correspondentes à melhor correlação obtida para o conjunto dos diferentes tipos de salas estudadas em Conceição *et al.* (2009) e estão apresentados na Tabela 2.5.

Tabela 2.5 – Valores das constantes usadas na simulação

Constante	Junho	Dezembro
a	0,234	0,442
b	21,903	14,106
c	22,10	6,30
d	39,52	20,00

Em condições de verão, o sistema AVAC é ligado sempre que a temperatura do ar interior for mais elevada que a temperatura preferida (TP), calculada a partir da equação (14); o oposto ocorre em condições de inverno, em que o sistema AVAC é ligado sempre que a temperatura do ar interior for mais baixa que a temperatura preferida.

2.7 Horas de desconforto térmico e por QAI

O cálculo do índice PMV é realizado neste estudo para cada intervalo de tempo incremental onde são recalculadas as grandezas envolvidas e é estudada a sua evolução ao longo do dia. Trata-se, desta forma, de uma grandeza que nos dá uma informação muito útil, mas apenas no que se refere a valores instantâneos. No entanto, para se analisar o desempenho dos sistemas de controlo do ar condicionado a mais longo prazo e obter resultados globais que permitam comparar os referidos sistemas, tornam-se indispensáveis outros índices que abarquem de forma mais abrangente os valores do índice PMV ao longo do tempo e os convertam num índice representativo da globalidade da situação de conforto térmico associada aos espaços analisados, naquilo que pode ser designado por modelo de avaliação integral.

Com este intuito Van der Linden *et al.* (2006) propuseram uma metodologia numérica que concretiza o propósito de realizar comparações globais dos sistemas, de carácter

integral, que denominaram de horas de desconforto térmico por calor e horas de desconforto térmico por frio. As horas de desconforto térmico por frio, HDF (em inglês *Cold Uncomfortable Hours*, CUH), são calculadas de acordo com a equação seguinte:

$$HDF = \sum_i \left(\frac{PPD_i}{PPD_{limit}} \right) \Delta t_i, \quad \text{para } PMV_i < PMV_{limit} \quad (16)$$

Para determinar as horas de desconforto térmico por calor, HDQ (em inglês *Warm Uncomfortable Hours*, WUH), a fórmula a utilizar é a seguinte:

$$HDQ = \sum_i \left(\frac{PPD_i}{PPD_{limit}} \right) \Delta t_i, \quad \text{para } PMV_i > PMV_{limit} \quad (17)$$

A letra “i” indica o subíndice associado ao intervalo de tempo especificado no cálculo e o subíndice “limit” refere-se aos limites estipulados previamente como aceitáveis para os valores do índice PMV. No caso do presente estudo, o valor mínimo do intervalo definido, PMV_{limit} , será igual a -0,7, para a fórmula das horas de desconforto térmico por frio, na equação (16), e o valor máximo dessa banda, PMV_{limit} igual a +0,7, será aplicado na fórmula dada pela equação (17), referente às horas de desconforto térmico por calor.

O que se pode depreender dos índices HDQ e HDF é que representam o somatório ponderado dos intervalos de tempo nos quais o índice PMV é inferior ao limite mínimo ou superior ao limite máximo, respetivamente. O fator de ponderação é a razão entre o índice PPD em cada intervalo considerado e o valor limite mínimo (para HDF), ou máximo (para HDQ), definido para esse mesmo índice. Isto significa que este processo de cálculo, para intervalos de tempo idênticos com desvios diferentes do PPD em relação ao limite estipulado, resultará num número de horas de desconforto térmico diferente, tanto maior quanto mais acentuado for o desvio em relação ao limite.

Metodologia idêntica é aplicada ao cálculo das horas de desconforto térmico por calor e das horas de desconforto térmico por frio, quando o sistema de controlo do sistema AVAC a utilizar é o do PMV adaptativo, ou aPMV, aplicando-se então:

$$HDF = \sum_i \left(\frac{aPPD_i}{aPPD_{limit}} \right) \Delta t_i, \quad \text{para } aPMV_i < aPMV_{limit} \quad (18)$$

e

$$HDQ = \sum_i \left(\frac{aPPD_i}{aPPD_{limit}} \right) \Delta t_i, \quad \text{para } aPMV_i > aPMV_{limit} \quad (19)$$

O $aPMV_{limit}$ na equação (18) é -0,7, e na equação (19) é +0,7.

Os valores destes índices permitem realizar uma análise mais abrangente dos resultados obtidos para o conforto térmico. Permitem determinar valores totais diretamente comparáveis entre vários procedimentos de controlo dos sistemas AVAC, e tirar, a partir da informação resultante das simulações, conclusões avisadas a respeito da validade dessas diferentes metodologias de uma forma clara e objetiva.

De forma similar, as horas de desconforto por QAI, são calculadas pela seguinte equação:

$$HDQA = \sum_i \left(\frac{PD_i}{PD_{limit}} \right) \Delta t_i, \quad \text{para } C_{CO_2} > C_{CO_2 limit} \quad (20)$$

Onde:

- C_{CO_2} é a concentração de dióxido de carbono [ppm];
- $C_{CO_2 limit}$ é a concentração de dióxido de carbono limite [ppm];
- PD é a percentagem de insatisfeitos (*Percentage Dissatisfied*) calculada pela equação (9).

O valor limite para a concentração de dióxido de carbono foi de 1800 ppm, definido na Norma ASHRAE 62.1 (2016).

2.8 Simulação numérica de edifícios

A simulação numérica do comportamento térmico dos edifícios é um tema que tem sido estudado por muitos autores. Ozeki *et al.* (1992), Cammarata *et al.* (1994) e Mendes e Santos (2001), Conceição (2003), Conceição *et al.* (2004), e Conceição e Lúcio (2006) abordaram este tema.

Ao longo dos últimos 50 anos têm sido desenvolvidas muitos e diferentes pacotes de *software* que visam a realização de simulações sobre o comportamento térmico dos edifícios, visando a previsão de consumos energéticos e das condições de conforto dos utilizadores. Muitos fatores influenciam o desempenho energético dos edifícios, nomeadamente a estrutura dos edifícios e as suas características, as condições climáticas e ambientais do local, as características dos sistemas de iluminação e AVAC, e a ocupação dos compartimentos, em termos do número de utilizadores dos espaços interiores e do seu comportamento (Zhao, 2012). A complexidade da análise é muito grande devido a este número elevado de fatores presentes e da sua grande variabilidade, tornando muito difícil a previsão dos consumos energéticos dos edifícios.

2.8.1 Modelos de cálculo do desempenho energético de edifícios

Zhao (2012) classifica os modelos de previsão do desempenho energético atualmente desenvolvidos em cinco tipos, de acordo com a abordagem do problema, em:

- Métodos de engenharia (ou físicos);
- Métodos estatísticos;
- Métodos de inteligência artificial;
- SVM (*Space Vector Machines*);
- Modelos de Grey.

Nos modelos que utilizam métodos de engenharia, para determinar os processos termodinâmicos e o comportamento energético do edifício ou de parte do mesmo, são usadas os princípios e leis físicas, o que pode ser implementado de forma mais simplificada, ou de modo mais elaborado, com cálculos mais precisos e passo a passo, conforme o grau de exatidão exigido (em fases iniciais de estudo uma análise mais simplificada pode ser suficiente). É nesta categoria que se pode classificar o programa

utilizado no presente trabalho. Trabalhos nesta área incluem Clarke (2001) e McQuiston *et al* (2005) no cálculo do desempenho dos sistemas AVAC.

Um padrão para o cálculo do consumo energético para aquecimento e arrefecimento dos espaços dos edifícios foi desenvolvido em ISO 13790 (2008).

Os modelos estatísticos são desenvolvidos a partir de um historial de dados preexistente, pela correlação dos valores dos consumos energéticos ou índice energético com as variáveis que o influenciam. Estes modelos precisam de ser aprimorados (treinados) para melhor se adaptarem aos dados e serem validados. Os modelos de regressão têm sido desenvolvidos para permitirem prever os consumos a partir de variáveis simplificadas, tais como alguns parâmetros ambientais, prever um índice energético, ou ainda estimar coeficientes térmicos de perdas de calor ou outros parâmetros de consumo energético (consultar WestPhal e Lamberts, 2004).

As redes neuronais são os modelos de inteligência artificial mais frequentemente estudados e aplicados ao problema da previsão dos consumos energéticos dos edifícios, devido à sua boa adaptação à resolução de problemas de natureza não linear, permitindo abordagens eficientes a este complexo problema, de acordo com Zhao (2012). Tem sido aplicado à análise de consumos de eletricidade, cargas térmicas de aquecimento e arrefecimento, estimação de parâmetros, operação e otimização de componentes, entre outras situações. A aplicação das redes neuronais aos estudos energéticos relacionados com radiação solar, velocidade do vento, sistemas solares de AQS, distribuição dos fluxos de ar num compartimento, temperatura do ar interior, análise dos sistemas AVAC e previsão dos consumos de energia foi revista em Kalogirou (2006).

Outros trabalhos foram desenvolvidos nesta área, tais como Kalogirou *et al.* (1997), a prever cargas de aquecimento em edifícios, Ekici e Aksoy (2009) na previsão de consumos energéticos em edifícios, Olofsson *et al.* (1998) em busca de um método para a previsão da potência térmica necessária a um edifício, com dados de desempenho limitados, Olofsson *et al* (2001) na previsão das necessidades energéticas a longo prazo com base em valores obtidos em medições de curto prazo.

2.8.2 Software de simulação de edifícios

Para a realização do presente trabalho pretendia-se uma ferramenta capaz de calcular as necessidades de energia térmica para a manutenção de condições de conforto térmico dos ocupantes dos edifícios, com a utilização dos métodos de controlo dos sistemas de AVAC apresentados em 2.6.

Está disponível no mercado um grande número de programas de simulação numérica de edifícios, com diferentes abordagens em termos dos métodos de cálculo energético, dos dados de entrada utilizados e das grandezas que podem ser obtidas como resultados. Crawley *et al.* (2008) realizaram uma análise comparativa entre diversos programas existentes à data, a partir da informação fornecida pelos autores dos programas, em termos da modelação geral utilizada, das cargas zonais, da envolvente dos edifícios e radiação solar incidente, da ventilação e infiltração, dos sistemas de energias renováveis, dos sistemas elétricos e de AVAC, das emissões de gases de efeito de estufa. Além disso, ainda consideram a avaliação económica, a disponibilidade de dados climáticos, o reporte de resultados, a sua validação, a sua interface de utilizador, as ligações a outros programas, e a sua disponibilidade.

São salientadas nesse estudo as dificuldades em encontrar um programa de simulação de consumos energéticos em edifícios que satisfaça todas as exigências dos utilizadores, que pretendem facilidade de utilização e introdução dos dados, modelos de boa precisão de cálculo, desempenho rápido na execução das simulações e apresentação dos resultados de forma amigável para o utilizador.

2.8.3 Modelo utilizado neste trabalho

No presente trabalho foi utilizado um modelo do comportamento térmico do edifício para calcular a evolução diária da temperatura do ar nos compartimentos e nos seus elementos construtivos, como as paredes, pavimentos e tetos, além de outros parâmetros, como a concentração de dióxido de carbono no ar interior e de contaminantes nos compartimentos. Utiliza métodos baseados nas leis físicas dos diferentes fenómenos analisados.

Em Conceição *et al.* (2004) é analisada pela primeira vez a resposta térmica da construção escolar, num estudo numérico em que é obtida a resposta térmica do edifício escolar em que o modelo numérico aplicado é validado em condições de Inverno.

O efeito de sombreamento verificado em edifícios escolares de topologia complexa, em condições de inverno é simulado numericamente em Conceição e Lúcio (2005), e os resultados indicam que ocorrem níveis de desconforto térmico não aceitáveis, em espaços com janelas que não recebem radiação solar ou sujeitas a efeito de sombreamento, na presença de céu limpo e de baixa temperatura exterior.

A qualidade do ar interior dos compartimentos dos edifícios escolares é analisada em Conceição e Lúcio (2006a), onde são monitorizadas as trocas de ar e são avaliadas as concentrações de dióxido de carbono e as estratégias de ventilação. Nesse estudo é apresentado um modelo de fluxo de ar ajustado, que visa a melhoria da qualidade do ar interior, e é utilizado principalmente em compartimentos com longos períodos de ocupação e sujeitos a ar poluído devido à presença de ocupantes em corredores e átrios.

Um estudo numérico para avaliar a resposta térmica de edifícios escolares é feito em Conceição e Lúcio (2006b). Neste estudo o modelo é validado, em condições de verão, através de valores experimentais da temperatura do ar e da humidade relativa. Os valores experimentais foram obtidos por medição no edifício real e feita a sua comparação com os valores obtidos na simulação numérica.

O trabalho de Conceição e Lúcio (2008a) visa a redução dos consumos energéticos do edifício e a melhoria do nível de conforto térmico dos utilizadores, aproveitando da melhor forma possível a elevada irradiância solar disponível na região algarvia. São identificados os compartimentos com condições de conforto térmico insuficientes e instalados sistemas de aquecimento virtuais com controlo pelo índice PMV e três coletores de ar, localizados por cima do telhado, com o propósito de aquecer o ar a ser injetado nos referidos compartimentos termicamente desconfortáveis.

Um sistema de ventilação térmica dotado de maior eficiência é desenvolvido em Conceição e Lúcio (2008b) e aplicado a um edifício escolar, em condições de inverno, com controlo pelo índice PMV de Fanger e monitorização da concentração de dióxido

de carbono. Este sistema permite obter conforto térmico e qualidade do ar aceitável, com consumos energéticos moderados, utilizando três coletores de ar colocados na área acima do telhado. Estes coletores de ar exterior aquecidos pelo sol podem, principalmente no final da manhã e de tarde, proporcionar níveis de aquecimento aceitáveis à maioria dos compartimentos ocupados. O coletor de menores dimensões tem maiores dificuldades em garantir as condições de conforto térmico que os de maiores dimensões.

Em Conceição e Lúcio (2009) é realizada uma simulação numérica da resposta térmica de um edifício escolar de topologia complexa, em condições de verão e de inverno, considerando quatro orientações diferentes.

Em Conceição e Lúcio (2010) é estudada numericamente a influência da presença de árvores externas opacas, às quais se atribuiu a forma piramidal, na resposta térmica de um edifício escolar, em condições de verão, em condições transitórias. Foram inseridas no modelo numérico 49 árvores virtuais opacas em frente das janelas, em cada um dos lados do edifício, para servirem como dispositivos de sombreamento.

Um modelo de conforto térmico adaptativo é utilizado na avaliação do conforto térmico dos ocupantes dos compartimentos de um complexo de edifícios escolares, usando o índice PMV, ao qual se aplica um coeficiente de correção baseado no valor da temperatura do ar exterior (Gomes, 2016).

É aplicado em Conceição *et al.* (2010) um modelo numérico da resposta térmica de edifícios escolares na evolução das condições de conforto térmico adaptativo em ambiente mediterrânico, cujos resultados revelaram valores semelhantes ao índice PMV de Fanger em condições ótimas de conforto térmico, com o índice PMV igual a zero. À medida que aumenta o índice PMV de Fanger, também aumenta a influência da adaptação. Foi avaliada a resposta térmica do edifício de um jardim de infância, as condições de conforto térmico disponíveis para os ocupantes, considerando a presença dos edifícios circundantes, e a validação dos resultados foi realizada em condições de Inverno e Verão.

São estudadas as condições de conforto térmico e os consumos de energia de edifícios escolares do sul de Portugal em Conceição *et al.* (2007). Neste estudo verifica-se que se

devem considerar os edifícios circundantes na simulação numérica. As salas de aula com janelas viradas a norte não garantem condições de conforto térmico, ao contrário das salas de aula com janelas viradas para sul, que são termicamente confortáveis.

Conceição *et al.* (2008a) realiza a avaliação da gestão da energia e dos níveis de conforto térmico num jardim de infância no sul de Portugal, de inverno. Já o trabalho de Conceição *et al.* (2008b) avalia a aplicação de uma estufa de interior nas condições de conforto térmico e no desempenho energético num jardim de infância no sul de Portugal, de inverno. São tidos em conta os edifícios vizinhos, o edifício da escola é considerado sem ocupação e são identificados potenciais compartimentos que possam ser utilizados como estufa.

É realizado em Conceição *et al.* (2008c) um estudo sobre conforto térmico nos espaços interiores de um edifício de um jardim de infância situado no sul de Portugal, em condições de verão. Os resultados obtidos indicam que a concordância entre os valores calculados e os dados experimentais é maior quando são introduzidos no modelo os edifícios circundantes. As diferenças não ultrapassam, em geral, os 2°C.

Conceição *et al.* (2009) avalia as condições de conforto térmico e os consumos de energia num jardim de infância, em condições de verão, com a utilização de diversas soluções passivas. São colocados dispositivos de sombreamento horizontais acima das janelas viradas a sul e colocadas árvores opacas de forma piramidal em frente às janelas viradas a leste e oeste. Os objetivos são reduzir a temperatura do ar interior e melhorar as condições de conforto térmico para os ocupantes.

Os sistemas AVAC são controlados com uma metodologia baseada no índice PMV em Conceição e Lúcio (2010b). O sistema de aquecimento funciona somente quando o índice PMV apresenta valores negativos e a potência de aquecimento é diretamente proporcional ao módulo dos valores do índice de conforto térmico. Os resultados indicam que o conforto térmico dos ocupantes é assegurado, em geral, por este método.

No trabalho de Conceição e Lúcio (2010c) estratégias solares passivas e ativas são implementadas num jardim de infância em condições ambientais mediterrânicas, em condições de verão e de inverno, utilizando ventilação natural e forçada, usando um

ciclo de ocupação real. Estas técnicas conseguem garantir conforto térmico aceitável e boa qualidade do ar interior nos compartimentos, com consumo de energia reduzido.

Os resultados obtidos em Conceição *et al.* (2012) podem ser usados para definir estratégias de ventilação do edifício, visando alcançar um bom compromisso entre o conforto térmico dos utilizadores e a qualidade do ar interior. Em condições de inverno, considera-se a ventilação natural nas salas de aula, com metade da área de janela aberta e ventilação forçada proveniente do corredor para o átrio interior, trabalhando como estufa. Em condições de verão opta-se por considerar igualmente a ventilação natural nas salas de aula, mas com toda a área de janela aberta. A ventilação forçada parte do recreio interior, que nesta situação é o espaço frio, sendo distribuída pelos diferentes compartimentos do edifício.

Em Conceição *et al.* (2012b) é desenvolvido o índice de PMV adaptativo (aPMV), baseado numa regressão linear, em função de parâmetros relativos ao interior dos compartimentos, como a temperatura do ar, a temperatura radiante média, a humidade relativa do ar e a velocidade do ar, e de outros parâmetros relativos aos ocupantes, como o índice de vestuário e o nível de atividade, e ainda da temperatura exterior. Em condições de verão o índice aPMV é menor do que o índice PMV de Fanger, mas em condições frias, de inverno, o aPMV é maior que o PMV.

No edifício escolar estudado, o conforto térmico é aceitável, no inverno, de acordo com o modelo de conforto térmico adaptativo (Conceição *et al.*, 2012b), enquanto em condições de verão os níveis de conforto térmico estão próximos do limite aceitável. A qualidade do ar interior apresenta resultados com níveis aceitáveis em condições térmicas de verão, e próximas do limite aceitável, no inverno.

Com essa finalidade, foi estudado o edifício do Complexo Pedagógico do Campus de Gambelas da Universidade do Algarve, cujos modelos tridimensionais foram aperfeiçoados. O mesmo tratamento foi efetuado ao edifício de Engenharia Civil do Campus da Penha. Foi realizada uma simulação para cada edifício, para determinação dos valores da radiação solar incidente nos edifícios, e estudados os parâmetros de conforto térmico e de qualidade do ar interior. Os resultados destes estudos foram

apresentados num conjunto de três seminários obrigatórios para a obtenção do grau de doutor, realizados na Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade do Algarve.

Sobre este tema foram desenvolvidos os trabalhos Conceição *et al.*, (2014a), Conceição *et al.* (2014b), e Conceição *et al.* (2012b), além de três seminários curriculares no âmbito do doutoramento.

Programa de simulação numérica de edifícios

O *software* que foi utilizado para a realização das simulações foi criado pelo Professor Eusébio Conceição e tem sido desenvolvido e aprimorado ao longo dos anos, com a inclusão de novos módulos visando diferentes propósitos. Este programa simula o comportamento térmico de edifícios com topologia complexa, avaliando não só a qualidade do ar interior dos compartimentos, mas também o conforto térmico dos ocupantes dos mesmos. Permite calcular a evolução do valor de diversas grandezas:

- A temperatura do ar no interior dos compartimentos e condutas, dos vidros das janelas, dos corpos interiores e das camadas dos corpos principais do edifício e das condutas;
- A massa de vapor de água e dos restantes gases no interior dos compartimentos e das condutas;
- Os fluxos de calor condutivos nas paredes dos edifícios;
- Os fluxos de calor evaporativos nos corpos principais e interiores e vidros;
- Os fluxos mássicos por difusão e convecção
- Os fenómenos de adsorção/desorção nos corpos interiores e principais;
- A distribuição da radiação solar no exterior do edifício e no interior dos compartimentos
- As trocas de calor no interior dos espaços;
- Os coeficientes de transferência de calor e massa;

O programa é constituído por cinco partes fundamentais, nomeadamente as funções auxiliares, a introdução de dados, os cálculos, a exportação de dados e a ajuda.

Na fase de introdução da topologia do edifício o utilizador importa a geometria tridimensional, previamente criada em programa de desenho assistido por computador. Também são incorporadas nesta fase as propriedades térmicas dos materiais constituintes da estrutura, e algumas outras condições.

Na terceira parte deste programa pode-se correr o projeto ou optar por pré-projeto, onde se pode definir a radiação solar ou os fatores de forma entre as superfícies.

Na fase de exportação dos resultados da simulação torna-se possível exportar para formato CAD a malha do edifício, o que permite a sua visualização. É possível observar as superfícies tridimensionais que compõem todos os compartimentos, com ou sem a sua separação em diferentes camadas, e ainda a radiação solar.

Os resultados numéricos para as diversas grandezas simuladas de conforto térmico e acústico, de consumo de energia térmica dos sistemas AVAC e os relativos à radiação solar podem ser obtidos em formato de texto, nomeadamente a radiação solar das superfícies interiores e exteriores opacas e das superfícies transparentes.

Modelo matemático do comportamento térmico do edifício

O modelo numérico é baseado em equações integrais de balanço de massa e de energia, aplicadas a uma representação tridimensional gerada em *software* de desenho assistido por computador, constituída por superfícies tridimensionais que representam a geometria simplificada dos corpos opacos e transparentes, espaços interiores e ductos dos edifícios. Este modelo está descrito em Conceição e Lúcio (2010).

As equações do modelo baseiam-se nos fenómenos de radiação, convecção, condução, evaporação e respiração, e são resolvidas pelo método de Runge-Kutta-Felberg com controlo de erro (Burden e Faires, 1985). A determinação dos coeficientes utilizados nas equações é realizada através de um submodelo que calcula, com recurso a expressões empíricas, os ciclos de ocupação dos espaços, a radiação solar incidente, as trocas de calor radiante, os coeficientes convectivos de transferência de massa e de calor, os fatores de forma internos, as estratégias de ventilação, e a termofisiologia humana.

Apresenta-se a seguir uma súmula do modelo numérico, em primeiro lugar as equações integrais do balanço de energia, seguidas das equações integrais do balanço mássico. Estas equações são fundamentadas nos fenmenos de conveco, conduo, radiao, condensaao e evaporao.

A evoluo diária da radiao solar  calculada numa sub-rotina do programa utilizando um conjunto de equaes desenvolvidas por Iqbal (1983), que permite determinar a irradiao solar difusa, direta e global incidentes numa superfície plana orientada arbitrariamente.

Os coeficientes de reflexo, absoro e transmisso da radiao difusa e direta incidente nos vidros do edifício são calculados a partir das suas propriedades ticas, descritas em Duffie e Beckman (1980). São ainda considerados os fenmenos relacionados com as trocas de calor latente, nomeadamente a evaporao e condensaao que ocorrem nas superfícies dos vidros e das paredes interiores e exteriores.

Equaes de balanço integral de energia

Nas equaes de balanço integral de Energia apresentadas a seguir os termos do lado esquerdo representam a acumulao de calor sensível nos corpos considerados. Os termos do lado direito das equaes representam as trocas térmicas presentes em cada situao.

- No ar do interior dos compartimentos

$$m_{ar} C_{p,ar} \frac{dT_{ar}}{dt} = \sum_i \dot{Q}_{OB_{ar}} + \sum_j \dot{Q}_{TB_{ar}} + \sum_k \dot{Q}_{IB_{ar}} + \dot{Q}_G + \dot{Q}_O + \dot{Q}_V + \dot{Q}_L + \dot{Q}_D \quad (21)$$

- m_{ar}  a massa do ar [kg];
- $C_{p,ar}$  o calor específico do ar a pressão constante [J/(kg · °C)];
- T_{ar}  a temperatura do ar [K];
- t  o tempo [s];
- $\dot{Q}_{OB_{ar}}$  a taxa de calor convectivo entre o ar e as superfícies dos corpos opacos [W];

- $\dot{Q}_{TB_{ar}}$ é a taxa de calor convectivo entre o ar e as superfícies dos corpos transparentes [W];
- $\dot{Q}_{IB_{ar}}$ é a taxa de calor convectivo entre o ar e as superfícies dos corpos interiores [W];
- \dot{Q}_G é a taxa de calor gerado pelos equipamentos dos sistemas de aquecimento e ar condicionado, computadores e iluminação; e pessoas presentes no compartimento [W];
- \dot{Q}_O é a taxa de calor gerado pelos ocupantes do compartimento [W];
- \dot{Q}_V é a taxa de calor devido ao sistema de ventilação [W];
- \dot{Q}_L é a taxa de calor latente devido à evaporação ou condensação que ocorre entre o ar e as superfícies circundantes, tais como os elementos principais do edifício, os vidros os corpos interiores [W];
- \dot{Q}_D é a taxa de calor convectivo entre o ar e o sistema de condutas [W].

- Nos corpos opacos do edifício

Os elementos constituintes dos edifícios não são homogêneos, nomeadamente as paredes, pavimentos, tetos, portas, os painéis e outros, motivo pelo qual são melhor modelados com a sua divisão em várias camadas que representam os seus diferentes materiais constituintes.

$$m_{OB} C_{p_{OB}} \frac{dT_{OB}}{dt} = \dot{Q}_{OB}^- + \dot{Q}_{OB}^+ + \dot{Q}_D + \dot{Q}_{R_{solar}} + \dot{Q}_{R_{sky}} + \dot{Q}_{R_{IN}} + \dot{Q}_{OB_{ar}} + \dot{Q}_L \quad (22)$$

Onde:

- m_{OB} é a massa dos corpos opacos [kg];
- $C_{p_{OB}}$ é o calor específico a pressão constante dos elementos opacos do edifício [J/(kg°C)];
- T é a temperatura dos corpos opacos do edifício [K];
- t é o tempo [s];
- \dot{Q}_{OB}^- é a taxa de calor entre uma camada e a anterior [W];
- \dot{Q}_{OB}^+ é a taxa de calor entre a camada e a posterior [W];
- \dot{Q}_D é a taxa de calor entre uma camada e a superfície exterior da conduta [W];

- $\dot{Q}_{R_{solar}}$ é a taxa de calor resultante da radiação solar incidente difusa e direta [W];
- $\dot{Q}_{R_{sky}}$ é a taxa de calor radiante entre a camada exterior das superfícies e as superfícies dos corpos exteriores circundantes ou o céu [W];
- $\dot{Q}_{R_{IN}}$ é a taxa de calor radiante entre as superfícies dos elementos principais do interior dos edifícios e as restantes [W];
- $\dot{Q}_{O_{Ar}}$ é a taxa de calor convectivo entre a camada circundante e o ar [W];
- \dot{Q}_L é a taxa de calor latente trocado por condensação ou evaporação entre a camada exterior e o ar [W].

- Nos corpos transparentes

$$m_{TB} C_{p_{TB}} \frac{dT_{TB}}{dt} = \dot{Q}_{R_{solar}} + \dot{Q}_{R_{sky}} + \dot{Q}_{R_{IN}} + \dot{Q}_{TB_air}^+ + \dot{Q}_{TB_air}^- + \dot{Q}_D + \dot{Q}_L \quad (23)$$

Onde:

- m_{TB} é a massa dos corpos transparentes [kg];
- $C_{p_{TB}}$ é o calor específico a pressão constante dos elementos transparentes do edifício [J/(kg°C)];
- T é a temperatura dos vidros [K];
- t é o tempo [s];
- $\dot{Q}_{R_{solar}}$ é a taxa de calor resultante da radiação solar incidente difusa e direta incidentes [W];
- $\dot{Q}_{R_{sky}}$ é a taxa de calor em forma de troca radiativa entre a superfície transparente e as superfícies dos corpos exteriores próximos e com o céu [W];
- $\dot{Q}_{R_{IN}}$ é a taxa de calor no interior do espaço entre as superfícies interiores dos vidros e as restantes [W];
- $\dot{Q}_{TB_air}^+$ é a taxa de calor convectivo entre os vidros e o ar exterior [W];
- $\dot{Q}_{TB_air}^-$ é a taxa de calor convectivo entre os vidros e o ar interior do compartimento [W];

- \dot{Q}_L é a taxa de calor latente trocado por evaporação ou condensação entre os vidros e o ar [W].

- Nos corpos interiores

$$m_{IB} C_{p_{IB}} \frac{dT_{IB}}{dt} = \dot{Q}_{R_{solar}} + \dot{Q}_{R_{IN}} + \dot{Q}_{IB_{air}} + \dot{Q}_L \quad (24)$$

Onde:

- m_{IB} é a massa dos corpos interiores [kg];
- $C_{p_{IB}}$ é o calor específico a pressão constante do material constituinte dos corpos interiores [J/(kg°C)];
- T é a temperatura dos corpos interiores do edifício [K];
- t é o tempo [s];
- $\dot{Q}_{R_{solar}}$ é a taxa de calor devido à radiação solar incidente difusa e direta [W];
- $\dot{Q}_{R_{IN}}$ é a taxa de calor radiativo no interior do compartimento entre as superfícies dos corpos interiores e os restantes [W];
- $\dot{Q}_{IB_{air}}$ é a taxa de calor por convecção entre os corpos interiores e o ar interior do compartimento [W];
- \dot{Q}_L é a taxa de calor latente trocado por condensação ou evaporação entre os corpos interiores e o ar interior do compartimento [W].

Equações integrais de balanço mássico

Nas equações de balanço integral de Energia apresentadas a seguir os termos do lado esquerdo representam a acumulação de massa nos corpos considerados. Os termos do lado direito das equações representam os fluxos de massa de vapor de água ou de contaminantes que ocorrem em cada situação.

- Vapor de água no interior dos compartimentos

$$V \frac{dC}{dt} = \dot{m}_{oi} - \dot{m}_{io} + \dot{m}_{ji} - \dot{m}_{ij} + \dot{m}_g + \dot{m}_{OB} + \dot{m}_{TB} + \dot{m}_{IB} \quad (25)$$

Onde:

- V é o volume da massa transferida [m^3];
- C é a concentração do vapor [kg/m^3];
- \dot{m}_{oi} é o fluxo mássico do ambiente exterior para o compartimento i [kg/s];
- \dot{m}_{io} é o fluxo mássico do compartimento i para o ambiente exterior [kg/s];
- \dot{m}_{ji} é o fluxo mássico dos espaços adjacentes para o compartimento i [kg/s];
- \dot{m}_{ij} é o fluxo mássico do compartimento i para os espaços adjacentes [kg/s];
- \dot{m}_g é o fluxo mássico gerado no compartimento i [kg/s];
- \dot{m}_{OB} é o fluxo mássico trocado entre o ar do espaço e as superfícies dos elementos opacos do edifício [kg/s];
- \dot{m}_{TB} é o fluxo mássico trocado entre o ar do espaço e as superfícies dos corpos transparentes do edifício [kg/s];
- \dot{m}_{IB} é o fluxo mássico trocado entre o ar do espaço e as superfícies dos corpos interiores do edifício [kg/s].

- Vapor de água ou contaminantes na matriz sólida (nos elementos opacos e interiores do edifício)

A equação integral de balanço mássico para os contaminantes é quase idêntica à do balanço mássico do vapor, mas não é considerada a transferência de massa entre o ar interior do compartimento e as superfícies transparentes.

$$V \frac{dC}{dt} = \dot{m}_{Ads} - \dot{m}_{Des} \quad (26)$$

Onde:

- V é o volume da massa transferida [m^3];
- C é a concentração do vapor [kg/m^3];
- \dot{m}_{Ads} é o fluxo de massa adsorvido pelos corpos opacos e interiores do edifício [kg/s];
- \dot{m}_{Des} é o fluxo de massa desorvido pelos corpos opacos e interiores do edifício [kg/s].

- Vapor de água e contaminantes nos corpos interiores e opacos

$$V \frac{dc}{dt} = \dot{m}_{OB/IB} - \dot{m}_{Ads} + \dot{m}_{Des} \quad (27)$$

Onde:

- V é o volume da massa transferida [m^3];
- C é a concentração do vapor [kg/m^3];
- $\dot{m}_{OB/IB}$ é o fluxo mássico convectivo entre as superfícies dos corpos opacos e interiores e o ar em torno deles [kg/s];
- \dot{m}_{Ads} é o fluxo de massa adsorvido pelos corpos opacos e interiores do edifício [kg/s];
- \dot{m}_{Des} é o fluxo de massa desorvido pelos corpos opacos e interiores do edifício [kg/s].

- Vapor de água na superfície dos vidros

Semelhante à anterior, mas não considera os termos relativos aos fluxos adsorvido e desorvido.

2.9 Radiação Solar

Os processos físicos que envolvem a transferência de energia através de ondas eletromagnéticas são designados por radiação. A energia transmitida por radiação não tem a necessidade de um meio para a sua propagação. Os diferentes comprimentos de onda (ou as diferentes frequências) associados a essa radiação conferem-lhes características diversas, como a banda dos raios ultravioleta, a banda da radiação visível ao olho humano e a banda da radiação infravermelha (Reger, 2010). A radiação solar é também representada na forma de partículas com uma determinada quantidade de energia, chamadas fótons. A quantidade de energia que o fóton transporta está associada à sua frequência (ou ao seu comprimento de onda), pela seguinte fórmula:

$$E = h \cdot \nu \quad (28)$$

- E é a energia do fóton [J];
- h é a constante de Planck ($6,63 \times 10^{-34}$ J·s);
- ν é a frequência do fóton, [s^{-1}].

O comprimento de onda pode ser calculado a partir da frequência pela seguinte equação:

$$\lambda = \frac{c}{\nu} \quad (29)$$

Onde c é a velocidade da luz [m/s];

A radiação solar atinge a superfície da terra de forma bastante heterogênea, não só pelo movimento da translação da terra em torno do sol, que causa as diferentes estações do ano, mas também varia com a posição do sol em relação ao plano que a recolhe, ao longo do dia. A presença de nuvens, de certos tipos de gases, como o ozono (O₃), o vapor de água (H₂O), o dióxido de carbono (CO₂) ou outros compostos presentes na atmosfera, podem bloquear ou absorver parte da radiação incidente no topo da atmosfera (Roriz, 2010). Esta absorção acontece com a radiação nas frequências ultravioleta, que são, em grande medida, absorvidas pelo ozono, protegendo assim os seres vivos que habitam este planeta dos efeitos nefastos deste tipo de radiação.

A radiação que atinge a superfície terrestre em linha reta, sem desvios na atmosfera, é chamada de radiação direta. A radiação difusa é a que atinge o solo depois de sofrer desvios na atmosfera, devidos ao fenómeno da refração da luz (Rosendo, 2010). Nos momentos do nascer e do pôr-do-sol, onde a posição do sol é muito baixa em relação ao horizonte, quase não chega radiação direta ao solo, predominando a radiação difusa.

Se o plano de captação da radiação for inclinado, ainda há outra componente da radiação global incidente, que se designa por radiação refletida ou albedo, que é proveniente da reflexão da luz no solo ou em outros corpos próximos.

Massa de ar (AM)

A massa de ar ou AM, do inglês *air mass*, é uma grandeza que indica o rácio entre comprimento do trajeto que a radiação solar descreve ao atravessar a atmosfera, num dia de sol claro, para atingir a superfície terrestre, e o comprimento que percorreria se

o sol estivesse no zénite do plano em que se encontra o observador (ALTENER, 2004). Para a zona exterior à atmosfera terrestre, a massa de ar é definida como AM0, e para o sol situado no zénite é definida como AM1.

Nos restantes casos, a AM pode ser calculada como o inverso do cosseno do ângulo de zénite, pela seguinte fórmula:

$$AM \approx \frac{1}{\cos \theta_z} \quad (30)$$

Onde θ_z é o ângulo de zénite [°].

O valor AM1 só pode ocorrer em localizações próximas do Equador, já que em lugares com latitudes maiores que 23,45° norte ou sul, que correspondem aos trópicos de Câncer e de Capricórnio, o sol nunca atinge o zénite. Isto sucede porque a máxima declinação solar (ângulo formado entre a posição do sol no movimento de translação da terra e o equador) que ocorre ao longo do ano é de 23,45°. Em Faro, por exemplo, nunca é possível termos AM1, porque a latitude de Faro é de 37°N, portanto, maior do que 23,45°N. É claro que quanto maior a distância percorrida pela luz na atmosfera, maior será a sua atenuação, o que faz com que o brilho de qualquer corpo celeste seja maior no zénite.

A importância desta grandeza decorre da sua utilização como valor de referência para os testes padrão que são efetuados aos módulos fotovoltaicos, e explicados em 2.10.2.3.

2.10 Aproveitamento da energia solar

A energia presente na radiação solar pode ser aproveitada de pelo processo físico da sua conversão em calor, nos coletores solares térmicos, ou pela conversão direta da energia presente no espectro luminoso em energia elétrica, através do denominado efeito fotovoltaico, nas células ou nos módulos fotovoltaicos. Existem ainda aqueles que são designados sistemas solares termoelétricos, que aproveitam a energia da radiação solar no processo térmico, e esse calor é posteriormente utilizado para a produção de vapor, numa central termoelétrica (Roriz, 2010).

2.10.1 Sistemas solares térmicos

Nos sistemas solares térmicos mais difundidos há diferentes tecnologias de aquecimento de líquido, que pode ser a água ou outro líquido circulante como o glicol. Os sistemas solares térmicos podem ser utilizados numa panóplia muito variada de aplicações, graças à sua modularidade, e porque permitem diferentes combinações da área de coletores e da capacidade de acumulação de energia térmica.

As necessidades de aquecimento podem ser supridas pelos sistemas solares térmicos, seja dos espaços interiores de edifícios, de aglomerados populacionais, ou das águas para consumo ou AQS (Águas Quentes Sanitárias). No entanto, a sua utilidade não se limita ao aquecimento, podendo também ser úteis em aplicações que vão de encontro às necessidades de arrefecimento, por exemplo, através do uso de superfícies radiantes, ou mesmo pelo ar condicionado solar.

Neste trabalho, porém, foi estudada a sua aplicação ao aquecimento dos espaços interiores dos edifícios, associados a superfícies radiantes, nomeadamente pisos, tetos e até paredes.

Parâmetros dos coletores solares térmicos

A eficiência do coletor é uma característica da maior importância, porque revela a sua qualidade como elemento de captação e aproveitamento energético. Corresponde à relação entre a potência transferida para o fluido ou potência útil e a potência da radiação solar incidente na superfície. Pode ser dada pela seguinte expressão geral:

$$\eta = \frac{P_u}{A \cdot G} \quad (31)$$

Onde:

- η é o rendimento ou eficiência do painel [-];
- P_u é a potência útil do coletor [W];
- A é a área de captação [m²];
- G é a irradiância solar incidente [W/ m²].

O denominador desta expressão representa a potência total incidente (potência de entrada).

Os coletores solares térmicos têm eficiência variável, dependendo dos valores da radiação solar e da diferença entre a temperatura do ar ambiente e a temperatura média do fluido térmico que por ele circula. A temperatura média do fluido é dada pela expressão:

$$T_m = \frac{T_f + T_i}{2} \quad (32)$$

Onde:

- T_f é a temperatura do fluido à saída do coletor (final) [°C];
- T_i é a temperatura do fluido à entrada do coletor (inicial) [°C].

A norma EN 12975 (2006) estabelece a seguinte expressão quadrática para a eficiência de um coletor solar térmico:

$$\eta = \eta_0 - a_1 \cdot \frac{T_m - T_a}{G} - a_2 \cdot \frac{(T_m - T_a)^2}{G} \quad (33)$$

Onde:

- η_0 é a eficiência ótica do coletor [-];
- a_1 é o fator de perdas de 1ª ordem [W/(m²·°C)];
- a_2 é o fator de perdas de 2ª ordem [W/(m²·°C)];
- T_m é a temperatura média do fluido no coletor [°C];
- T_a é a temperatura do ar ambiente em torno do coletor [°C];
- G é a irradiância solar incidente [W/m²].

Os valores dos fatores de perdas são obtidos através dos testes indicados na norma citada.

2.10.2 Energia solar fotovoltaica

Esta forma de aproveitamento da energia solar corresponde a uma conversão direta da energia presente na radiação solar em corrente elétrica. É baseada no denominado efeito fotovoltaico, que é um processo que ocorre em determinados materiais, geralmente em semicondutores, como o silício (Si) e o germânio (Ge), e outros compostos como o arsenieto de gálio (GaAs) e até em corantes especiais.

2.10.2.1 Efeito fotovoltaico e célula fotovoltaica

Os fótons que compõem a radiação solar atingem a estrutura atômica do material e libertam a energia de que são portadores fornecendo-a aos elétrons da camada mais afastada do núcleo. Estes elétrons, ao receber esta quantidade de energia, podem dar o salto e eventualmente libertar-se da influência do átomo respectivo, ficando livres para serem integrados na corrente elétrica.

Na realidade, a energia presente nos fótons varia conforme o seu comprimento de onda, que está associado a uma determinada banda do chamado espectro solar, sendo, em não raros casos, insuficiente para causar a libertação de um elétron. Isto ocorre porque há um valor mínimo de energia, ou hiato energético E_g (do termo inglês *band-gap*), necessário para que ocorra o efeito fotovoltaico, com valores característicos para cada material utilizado (Rosendo, 2010). No caso do silício, o hiato energético é de 1,12 eV (elétron-Volt), o do arsenieto de gálio é de 1,43 eV e o do arsenieto de gálio e alumínio é de 1,7 eV. A unidade eV é o valor da energia necessária para que o elétron se liberte da influência do núcleo do átomo, passando da banda de valência para a banda de condução.

De acordo com a IEA (2015a) a tecnologia do silício multicristalino representou 69% da produção mundial de módulos solares fotovoltaicos, seguida do silício monocristalino com 24%, o telurieto de cádmio com 3%, o silício amorfo com 2% e o CIGS (selenieto de cobre, índio e gálio) com 2%. As restantes não tiveram representatividade suficiente para serem incluídas nos dados do estudo.

Célula Fotovoltaica

A célula fotovoltaica é a unidade fundamental de conversão energética de um sistema fotovoltaico. Vêm em tamanhos e formatos variáveis, geralmente entre 1 a 10 cm de lado, e tipicamente as de 10x10 cm produzem cerca de 1 a 2 W de potência de pico (ALTENER, 2004).

Módulo ou painel fotovoltaico

Conjunto agrupado de células fotovoltaicas em série (mais frequentemente), em paralelo, ou em ligação mista das duas anteriores, de forma a gerar a corrente e a tensão desejadas para o conjunto. É comum apresentarem 36, 60 ou 72 células em série, conforme a tensão pretendida.

Campo fotovoltaico (*array*)

É a interligação de vários módulos para se obterem ainda maiores potências, como para o caso de centrais fotovoltaicas de produção de eletricidade para venda à rede.

São realizadas ligações em série, quando necessário para obter as tensões projetadas, e associados em paralelo quando se pretende aumentar o valor da intensidade de corrente obtida, ou uma associação mista, caso mais frequente nas instalações de maior potência, exatamente com o objetivo de lograr potências mais elevadas.

O conjunto de módulos ou campos formam o gerador fotovoltaico, num esquema representado na Figura 2.4.

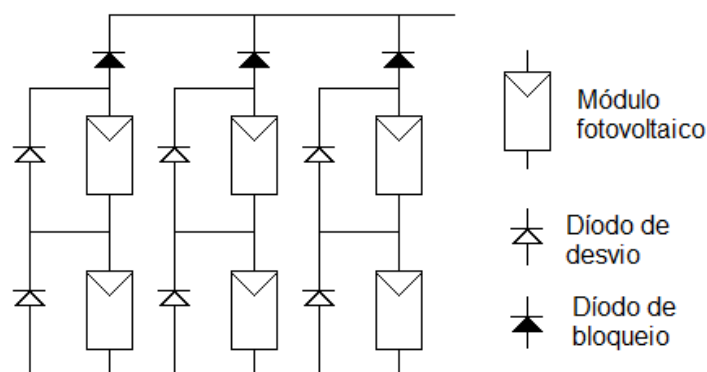


Figura 2.4: Uma das estruturas habituais dos geradores fotovoltaicos, com os módulos fotovoltaicos e os diodos de desvio e de bloqueio, onde se pode observar as ligações em série e em paralelo.

Pode ser observada a associação de módulos em série, em inglês designadas *strings*, e em português também chamadas fileiras ou ramos. Por sua vez, as fileiras são associadas em paralelo. Podem-se ver também os díodos de bloqueio, que são por vezes utilizados para evitar a inversão do sentido da corrente, e os díodos de desvio (em inglês *bypass*), que evitam problemas relacionados com o sombreamento ou com os pontos quentes (*hot spots*) (Marcar T., 1994).

Silício Monocristalino

Funde-se silício de grau elevado de pureza (99,9999%) num cadinho e introduz-se no material fundente um pequeno cristal de silício designado “semente”. Esta semente é puxada gradualmente para cima num movimento helicoidal muito lento, ao mesmo tempo que o silício vai arrefecendo, em torno do cristal semente. Deste modo o silício forma um único cristal cilíndrico, que pode alcançar o comprimento de 2 metros. Este cristal é designado lingote e o método é conhecido como processo Czochralski, o cientista que o inventou.

Silício Policristalino

Num processo mais simples e que exige menos tempo e energia, muito frequentemente utilizado, o silício derretido é vertido diretamente num molde, geralmente quadrado, solidificando então num lingote (ALTENER, 2004). A cristalização ocorre, mas como não há a referência do cristal semente e o arrefecimento é mais rápido, formando-se muitos cristais, em forma de granulado, com divisões visíveis entre eles onde as ligações são irregulares e aleatórias. Nas divisões entre os cristais ocorrem maiores perdas, o que leva a um rendimento ligeiramente inferior por parte do silício policristalino, desvantagem essa contrariada pelo seu custo também ligeiramente inferior.

Silício Amorfo

Outra opção é o silício amorfo, em geral sujeito a um processo de hidrogenação, chamado por isso amorfo hidrogenado, ou a-Si. O seu rendimento, devido à distribuição aleatória dos seus átomos, é inferior ao do silício policristalino, rondando valores de 6 a

8%, além de apresentar quebras no valor da potência de saída após os primeiros meses de utilização (ALTENER, 2004).

2.10.2.2 Grandezas características de células e módulos

As características dos módulos fotovoltaicos variam de forma apreciável, não apenas pelo facto de serem utilizados diferentes materiais na sua fabricação, mas também pelas diversas tecnologias desenvolvidas até ao momento, que levam a processos produtivos muito diversificados.

Mantendo o foco nas características elétricas dos painéis fotovoltaicos, obviamente que as grandezas a caracterizar são a intensidade de corrente elétrica, representada pela letra i (minúscula) quando se trata de uma corrente variável no tempo, como no caso da corrente alternada, e I quando é um valor constante no tempo, como na denominada corrente contínua.

2.10.2.3 Condições de Referência (STC)

Para possibilitar a comparação entre os diferentes tipos de módulos e células foi necessário criar um determinado conjunto de condições que, replicadas em todos os testes a efetuar, permitissem avaliar de modo uniforme, coerente e universal as potencialidades dos diferentes tipos de painéis.

Surgiu então a definição de STC (do inglês *Standard Test Conditions*), condições padrão de teste, ou condições de referência. Estas condições servem como termo de comparação entre diferentes células ou módulos fotovoltaicos, o que exige a aplicação de condições uniformes e universais de teste, definidas nas normas da Comissão Eletrotécnica Internacional, IEC 60904-1 (2006), IEC 60904-2 (2015) e IEC 60904-3 (2016), com os seguintes parâmetros:

- Irradiância solar de 1000 W/m^2 ;
- Temperatura na célula de 25°C , com uma tolerância de $\pm 2^\circ\text{C}$;

- Massa de ar, $AM = 1,5$, que corresponde à distribuição do espectro da irradiância solar de referência de acordo com a norma IEC 60904-3 (2016);
- ASTM G173-03, espectro solar padrão.

Esta radiação corresponde a um valor alcançado em torno do meio-dia solar, com o painel virado na direção do Sol, estando o mesmo completamente limpo de poeiras ou outros depósitos na sua superfície. A densidade atmosférica ou AM é de 1,5. Como apresentado no ponto 2.9, a definição destas condições está relacionada com o ângulo de incidência da radiação solar no local, conforme a posição do sol em relação à vertical do lugar. A potência elétrica gerada pelo painel nestas condições é a sua potência máxima ou potência de pico e virá expressa em W_p (watts-pico). Como o mesmo método é usado para todos os módulos, dois módulos diferentes, que tenham 100 W_p , produzirão a mesma potência máxima às condições descritas.

O interesse das células fotovoltaicas reside na energia que são capazes de gerar a partir da radiação solar recebida, e há um gráfico representativo da célula ou módulo que é usado em todos os manuais e folhetos de características fornecidos pelos fabricantes: trata-se da denominada curva I-V, que relaciona graficamente os valores da intensidade de corrente fornecida pela célula ou módulo à carga que alimenta, com a diferença de potencial ou tensão elétrica aos seus terminais (Castro, 2011).

Outro gráfico que por vezes é apresentado é o da curva P-V, que representa a variação da potência produzida pela célula, com a tensão aplicada aos bornes.

Pode-se ver na Figura 2.5 um gráfico que apresenta as curvas características I-V e P-V de uma célula fotovoltaica de silício monocristalino, com as tensões e intensidades de corrente características, e identificado o ponto de potência máxima.

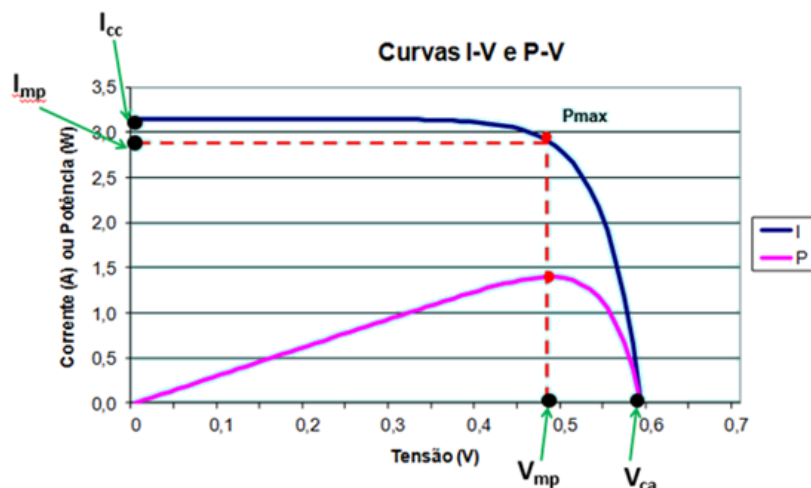


Figura 2.5: Curvas características I-V e P-V de uma célula fotovoltaica de silício monocristalino, obtidas a partir do modelo apresentado neste trabalho.

A curva I-V às condições de referência também fornece alguns valores característicos importantes das células e módulos, no dimensionamento dos sistemas fotovoltaicos, que são:

- A corrente de curto-circuito, I_{cc} ou I_{sc} [A];
- A tensão de circuito aberto, V_{oc} ou V_{ca} [V];
- A máxima potência, P_{max} [W];
- A tensão à máxima potência, V_{mp} ou V_{mpp} [V];
- A corrente à máxima potência, I_{mp} ou I_{mpp} [A];
- Rendimento ou eficiência, η [%];
- Fator de forma ou FF [-].

Corrente de curto-circuito

A intensidade de corrente de curto-circuito, I_{sc} (*short circuit*), ou I_{cc} , é a corrente (em Amperes) fornecida pela célula quando os seus terminais são ligados por um curto-circuito, isto é, quando a tensão aos seus terminais é nula. Corresponde ao máximo valor de intensidade que pode gerar nas condições padrão de teste (STC). Em termos práticos pode ser medida com um amperímetro ligado aos terminais.

Tensão de circuito aberto

É a tensão (em Volts) que surge aos terminais da célula quando está em vazio, ou seja, sem nenhuma carga ligada, portanto com corrente nula, representada por V_{oc} (“open circuit”) ou V_{ca} (circuito aberto). Pode ser medida com um voltímetro ligado entre os seus terminais. A tensão gerada não será superior a este valor, nas condições STC.

Potência máxima ou potência de pico

É o valor máximo da potência de saída da célula, P_{max} , obtida às condições STC, e dada em Wp. Na prática, em certas condições de temperatura e radiação, a célula até pode fornecer um valor um pouco maior de potência do que o correspondente a P_{max} .

A potência, em corrente contínua, que é o tipo de tensão produzida pela célula fotovoltaica, é dada pelo produto da tensão pela intensidade de corrente:

$$P = V \cdot I \quad (34)$$

Onde:

- P é a potência elétrica gerada pela célula [W];
- V é a tensão aos terminais da célula [V];
- I é a intensidade de corrente para a carga [A].

A partir deste valor de potência são definidos outros dois valores característicos, nomeadamente, a tensão e a intensidade de corrente à máxima potência. Este ponto é conhecido como ponto de máxima potência ou MPP (*maximum power point*).

Tensão no ponto de máxima potência

Esta é a designação do valor de tensão no ponto de máxima potência, sendo geralmente representado por V_{mp} ou V_{mpp} .

Corrente no ponto de máxima potência

Representada simbolicamente por I_{mp} , ou I_{mpp} , é o valor da intensidade de corrente que pode ser observado na figura 2.3, correspondente ao MPP. A relação entre estas três grandezas elétricas é dada por:

$$P_{max} = V_{mp} \cdot I_{mp} \quad (35)$$

Onde:

- P_{max} é a potência elétrica máxima ou de pico gerada pela célula [W];
- V_{mp} é a tensão aos terminais da célula no ponto de máxima potência [V];
- I_{mp} é a intensidade de corrente para a carga no ponto de máxima potência [A].

Coefficiente de temperatura para a tensão de circuito aberto

O coeficiente de temperatura para a tensão de circuito aberto é o valor da variação da tensão de circuito aberto em função da temperatura da célula, considerando a variação linear (declive da reta). Este valor é representado geralmente por β , ou TCV_{OC} (do inglês *temperature coefficient*), e expresso em $\%/^{\circ}C$ ou $mV/^{\circ}C$.

Coefficiente de temperatura para a corrente de curto-circuito

O coeficiente de temperatura para a corrente de curto-circuito é o valor da variação da corrente de curto-circuito em função da temperatura da célula, considerando a variação linear. Representado geralmente por α , ou TCI_{SC} , e expresso em $\%/^{\circ}C$ ou $mA/^{\circ}C$.

Coefficiente de temperatura para a potência máxima

O coeficiente da temperatura para a potência máxima é o valor da variação da potência máxima em função da temperatura da célula, considerando a variação linear. Representado geralmente por γ , ou TCP_{max} , e expresso em $\%/^{\circ}C$ ou $mW/^{\circ}C$. Ainda nem todos os fabricantes o fornecem, porque não é imposta esta medição pela norma IEC 61215 (2016), embora seja cada vez mais frequente que o façam, devido à sua utilidade. Caso o fabricante não indique o valor deste coeficiente, é possível determiná-lo, de forma aproximada, pelo processo de cálculo previsto na norma IEC 60891 (2009) a partir

do coeficiente de temperatura para a corrente de curto-circuito e do coeficiente de temperatura para a tensão de circuito aberto.

Rendimento ou eficiência

O rendimento é dado pela razão entre a potência de pico do módulo, expressa em W, e o produto da área de captação do módulo, em metros quadrados, pelo valor da irradiância solar incidente definida para as condições STC, de 1000 W/m², representado pela letra η , e definido por:

$$\eta = \frac{P_{max}}{A \cdot G_{STC}} \quad (36)$$

Onde:

- η é o rendimento da célula (geralmente apresentado em percentagem);
- P_{max} é a potência de pico do módulo ou célula [W];
- A é a área do módulo ou célula [m²];
- $G_{STC} = 1000 \text{ W/m}^2$, é a irradiância solar nas condições padrão de teste.

Fator de Forma

A partir da curva I-V é definido outro parâmetro da célula: o fator de forma, ou FF, com designação inglesa de *Fill Factor*, ou fator de preenchimento. É dado pela razão entre a potência de pico do módulo e o produto da sua tensão de circuito aberto pela sua intensidade de corrente de curto-circuito, às condições de referência (ALTENER, 2004).

O FF é dado então pela seguinte fórmula:

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{OC} \cdot I_{SC}} = \frac{V_{mp} \cdot I_{mp}}{V_{OC} \cdot I_{SC}} \quad (37)$$

Onde:

- P_{max} é a potência elétrica máxima ou de pico gerada pela célula [W];
- V_{mp} é a tensão aos terminais da célula no ponto de máxima potência [V];
- I_{mp} é a intensidade de corrente para a carga no ponto de máxima potência [A];
- I_{sc} é a intensidade de corrente de curto-circuito [A];
- V_{oc} é a tensão de circuito aberto [V].

O FF pode ser considerado como um bom parâmetro de medida da qualidade da célula fotovoltaica, atingindo valores entre 0,7 até valores próximos de 0,85 para boas células de c-Si (silício monocristalino), mas somente de 0,5 a 0,7 para as de silício amorfo, a-Si, de acordo com ALTENER (2004). Isto significa que, para valores idênticos de tensão de circuito aberto e de corrente de curto-circuito uma célula de silício cristalino tem potência de pico superior à célula de silício amorfo.

2.10.2.4 Condições NOCT

As condições padrão de teste (STC) são muito úteis para a uniformização dos testes aos módulos fotovoltaicos. No entanto, as temperaturas dos módulos que operam em situações reais são muito frequentemente superiores aos 25°C, pelo menos no clima do Algarve. Além disso, os níveis de radiação solar são geralmente inferiores aos definidos nas STC. Surge então a necessidade de testar os painéis sob condições mais frequentes no dia a dia.

Para determinar com maior precisão a potência produzida com uma célula solar em condições reais, usa-se o que se denominou como Temperatura Nominal de Operação da Célula (NOCT), do inglês *Nominal Operating Cell Temperature*. A NOCT é a temperatura a que operam as células solares fotovoltaicas em circuito aberto num módulo sujeito às seguintes condições:

- Irradiância na superfície da célula: $G = 800 \text{ W/m}^2$;
- Temperatura do ar ambiente: $T = 20^\circ\text{C}$;
- Velocidade do vento: $v = 1 \text{ m/s}$;
- Montagem com lado posterior do módulo aberto.

A NOCT varia de módulo para módulo, com valores entre os 33°C e os 58°C, tipicamente em torno dos 45 a 48°C. Quanto mais baixo o valor da NOTC de um módulo, tanto melhor o seu desempenho em situações reais.

Quase todos os fabricantes já apresentam estes parâmetros às condições NOCT, porque já se converteu num padrão da indústria.

2.10.2.5 Modelo matemático da célula fotovoltaica

A curva característica da célula de silício é geralmente modelada matematicamente através de um circuito elétrico equivalente. O modelo mais simples é aquele que representa a célula como uma fonte de corrente ideal dependente do nível de radiação luminosa, I_L , em paralelo com um díodo, mas há outros modelos que incluem uma resistência em série e outra em paralelo, para representar certos tipos de perdas (Castro, 2011). O modelo de um díodo pode ser observado na figura 2.4.

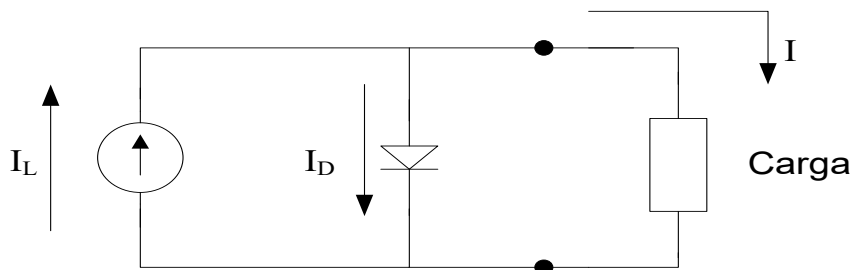


Figura 2.6: Circuito equivalente simplificado, com um díodo.

Neste circuito, a fonte de corrente tem uma intensidade I_L . Esta corrente é considerada diretamente proporcional à irradiância incidente na célula. A intensidade aplicada a uma carga aplicada aos seus terminais, I , tem um valor que é o da intensidade de corrente da fonte subtraída da intensidade de corrente que se desvia pelo díodo presente no modelo equivalente:

$$I = I_L - I_D \quad (38)$$

Onde:

- I é a corrente que circula pela carga [A];
- I_L é a corrente gerada pela luz, [A];
- I_D é a corrente que circula pelo díodo [A].

A corrente que passa através do díodo é dada pela fórmula exponencial, conhecida como equação do díodo de Shockley:

$$I_D = I_0 \left(e^{\frac{V}{mV_T}} - 1 \right) \quad (39)$$

Onde:

- I_0 é a corrente inversa de saturação do díodo [A];
- V é a tensão aos terminais da célula fotovoltaica [V];
- V_T é o potencial térmico [V];
- m é o fator de idealidade do díodo, que pode ser igual a 1, se for o díodo ideal ou maior que 1 para o díodo real.

O potencial térmico é dado pela seguinte fórmula:

$$V_T = \frac{kT}{q} \quad (40)$$

Onde

- $q = 1,6 \cdot 10^{-19}$ C, é a carga elétrica do eletrão;
- $K = 1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K, é a constante de Boltzmann;
- T é a temperatura da célula, em Kelvin [K].

A grande vantagem de utilizar um modelo matemático é que este permite representar a célula por parâmetros, adaptando os cálculos a situações diferentes daquelas em que são realizados os testes padrão, facilitando a simulação dos efeitos dessas condições diferentes das condições de referência no funcionamento e produção elétrica da célula.

Em Castro (2011) mostra-se que I_L é igual a I_{SC} . Logo, a corrente I que vai para a carga, é dada por:

$$I = I_{SC} - I_0 \left(e^{\frac{V}{mV_T}} - 1 \right) \quad (41)$$

- I é a corrente que circula pela carga [A];
- I_{SC} é a corrente de curto-circuito gerada pela luz [A];
- I_0 é a corrente inversa de saturação do díodo [A];
- V é a tensão aos terminais da célula fotovoltaica [V];
- V_T é o potencial térmico [V];

- m é o fator de idealidade do díodo [-].

A corrente inversa de saturação, em condições STC, é dada por:

$$I_0 = \frac{I_{SC}}{\frac{V_{OC}}{e^{m \cdot V_T}} - 1} \quad (42)$$

Onde todos os valores estão às condições de referência (STC). O valor de m de uma célula fotovoltaica será 1 se for um díodo ideal, ou maior se considerarmos um díodo real. Para módulos, Castro R. (2011) propõe uma fórmula para determinar o cálculo do fator de idealidade:

$$m = \frac{V_{mp}^r - V_{OC}^r}{V_T^r \cdot \ln\left(1 - \frac{I_{mp}^r}{I_{SC}^r}\right)} \quad (43)$$

Onde

- m é o fator de idealidade [-];
- V_{oc}^r é a tensão de circuito aberto [V];
- V_{mp}^r é a tensão de saída no ponto de máxima potência [V];
- I_{sc}^r é a intensidade de corrente de curto-circuito [A];
- I_{mp}^r é a intensidade de corrente de saída no ponto de máxima potência [A];
- V_T^r é o potencial térmico em condições de referência [V].

Na fórmula anterior considera-se que os parâmetros são obtidos às condições de referência, sendo introduzido um índice superior 'r' para essa identificação.

Consequentemente, a potência de saída será calculada por:

$$P = V \left[I_{SC} - I_0 \left(e^{\frac{V}{m \cdot V_T}} - 1 \right) \right] \quad (44)$$

A corrente de curto-circuito é afetada de modo diretamente proporcional pela irradiância solar G . A influência da variação de temperatura neste parâmetro não é muito significativa. É dada por um coeficiente de temperatura α , fornecido pelo fabricante, obtido a partir de ensaios.

A fórmula para o cálculo de I_{sc} que combina estes dois efeitos é:

$$I_{sc} = I_{sc}^r \frac{G}{G^r} [1 + \alpha(T - T^r)] \quad (45)-$$

- α é o coeficiente de temperatura para a corrente, [%/°C] ou [mA/°C];
- I_{sc} é a intensidade da corrente de curto-circuito com irradiância G e temperatura absoluta T [A];
- I_{sc}^r é a intensidade da corrente de curto-circuito em condições de referência [A];
- G^r é a irradiância em condições de referência (1.000 W/m²);
- T^r é a temperatura absoluta em condições de referência (298,16 K);

A temperatura absoluta é definida pela seguinte fórmula:

$$T = \theta + 273,15 \quad (46)$$

Onde θ é a temperatura na escala Celsius [°C].

A corrente inversa de saturação, I_0 , é bastante influenciada pela variação da temperatura da célula, através do cubo da razão entre a temperatura absoluta real e a temperatura absoluta às condições de referência, e ainda pela variação do potencial térmico, como se pode observar na fórmula seguinte (Castro 2011):

$$I_0 = I_0^r \left(\frac{T}{T^r} \right)^3 e^{\frac{\varepsilon}{m'} \left(\frac{1}{V_T^r} - \frac{1}{V_T} \right)} \quad (47)$$

Onde:

- I_0^r é a corrente inversa de saturação [A], às STC;
- T é a temperatura real absoluta da célula [K];
- T^r é a temperatura absoluta da célula [K], às STC;
- ε é o hiato do silício, 1,12 eV;
- V_T é o potencial térmico [V];
- V_T^r é o potencial térmico [V], às STC;
- m' é o fator de idealidade corrigido do módulo [-].

O parâmetro m' corrige o efeito de haver várias em células em série em cada módulo, cujo valor é obtido a partir de:

$$m' = \frac{m}{\text{número de células em série}} \quad (48)$$

O modelo descrito acima permite determinar, a partir dos valores das características de um módulo às condições de referência, fornecidos pelo fabricante, os mesmos parâmetros em condições de temperatura e/ou irradiância solar diferentes das de referência. Calcula-se V_T , I_{SC} , I_0 para os novos valores de temperatura absoluta T , e de irradiância solar G , e aplicam-se na equação (40).

Em seguida deriva-se a potência P em ordem a V , e iguala-se a expressão a zero, para encontrar o valor máximo de P . Na realidade, desta resolução surge uma expressão não linear em ordem a V que deve ser resolvida por um método iterativo, que pode ser estudado em Castro R. (2011). O valor de V obtido é a tensão à máxima potência, para as novas condições de temperatura e irradiância solar. Substituindo este valor de V_{mp} calculado na equação (40), obtém-se o valor de corrente I_{mp} que lhe corresponde. Finalmente, pelo produto de V_{mp} por I_{mp} , obtém-se a potência máxima P_{max} , que o módulo forneceria às novas condições especificadas.

Como no presente estudo se dispõe dos valores de temperatura ambiente e irradiância solar ao longo do dia, em intervalos predefinidos, pode-se calcular a potência máxima em cada instante com o modelo acima descrito.

A temperatura que entra na formulação do modelo não é a temperatura ambiente (do ar), mas sim a da célula. Como não está disponível informação a respeito da temperatura da célula, torna-se necessário proceder à estimação desse valor. O cálculo pode ser feito a partir da fórmula seguinte (Luque, 2003):

$$T = T_0 + \frac{(NOCT-20)}{800} \times G \quad (49)$$

Onde:

- T é a temperatura do módulo fotovoltaico [°C];
- T_0 é a temperatura exterior [°C];

- NOCT é a temperatura nominal de operação da célula [°C], que depende do módulo;
- G é a irradiância solar [W/m²].

Como foi referido anteriormente, é necessário um processo iterativo para calcular a potência máxima sempre que ocorre uma alteração das condições ambientais.

Pode-se recorrer a um procedimento mais expedito, evitando esse inconveniente, também com informação disponível nos manuais dos fabricantes. Usando a fórmula que calcula o rendimento (STC) e resolvendo em ordem a P obtém-se:

$$P = G \cdot A \cdot \eta \quad (50)$$

Onde:

- P é a potência de saída do painel [W];
- G é a irradiância incidente no painel [W/m²];
- A é a área do módulo [m²];
- η é o rendimento [-].

Esta fórmula é válida para qualquer valor de G , A e η . O produto de G pela área A corresponde à potência total incidente no painel, em watts. O efeito da variação da radiação está inserido nesta fórmula, mas torna-se necessário considerar o efeito causado pela variação de temperatura.

Calcula-se então um fator que representa a redução (ou aumento) da potência de saída devida à subida (ou abaixamento) da temperatura, para corrigir o valor do rendimento para as condições atuais, que será designado por " ρ ", a partir do coeficiente de temperatura para a potência máxima, de acordo com a seguinte fórmula:

$$\rho = 1 + (T - 25) \times TCP_{max} \quad (51)$$

Onde:

- ρ é um fator que corrige o rendimento de acordo com a temperatura de funcionamento [-];
- T é a temperatura real da célula ou módulo fotovoltaico [°C];
- TCP_{max} é o coeficiente de temperatura para a potência máxima.

Com este fator ρ , a potência de saída do módulo para quaisquer valores de radiação e temperatura é dada por:

$$P = G \cdot A \cdot \eta \cdot \rho \quad (52)$$

Onde:

- P é a potência de saída do módulo [W], para uma irradiância G ;
- G é a irradiância real incidente no painel ou célula [W/m^2];
- A é a área do módulo [m^2];
- η é o rendimento [-], às condições STC.
- ρ é o fator de correção da potência, devido à variação de temperatura na célula [-];

Os procedimentos desenvolvidos para o cálculo da potência gerada pelo sistema fotovoltaico foram baseados na radiação incidente nos módulos e considerando a influência da temperatura das células. Este modelo representa uma forma de cálculo da energia produtível por um sistema fotovoltaico mais exata do que alguns dos cálculos geralmente efetuados para estes sistemas, que entram em linha de conta com valores médios mensais de horas de pico solar, e, por vezes, com valores médios de temperatura mensais.

As equações apresentadas para a radiação solar, e para a diferença de temperatura entre o módulo e o ar, mostram que, tanto as perdas condutivas como as convectivas são lineares com a radiação solar incidente, para uma dada velocidade do vento, desde que a resistência térmica e o coeficiente de transferência de calor não variem fortemente com a temperatura.

A energia produzida num dado intervalo de tempo, considerando a potência constante nesse intervalo, é calculada multiplicando o valor de potência determinada, já com os

efeitos da temperatura e irradiância, pelo respetivo intervalo de tempo. No caso presente, os cálculos foram executados para intervalos iguais de 15 minutos, ou 0,25 horas. A energia produzida num intervalo de tempo i qualquer, designada W_i , será dada por:

$$W_i = P_i \times 0,25 \quad [\text{Wh}] \quad (53)$$

Onde P_i é a potência gerada pelos painéis durante esse período de tempo i [W].

A energia total produzida durante o dia, W_d , é o somatório dos valores de energia produzida obtidos para todas as janelas temporais:

$$W_d = \sum_1^n W_i \times 0,25 \quad [\text{Wh}] \quad (54)$$

Este valor de energia representa a energia produtível pelo gerador fotovoltaico, ou seja, pelo "array" ou campo fotovoltaico.

Mas esta energia tem de ser controlada e transmitida até poder ser injetada na rede, de forma a ser usada na modalidade de autoconsumo, pelo que é necessário considerar as perdas daí resultantes. Atendendo a valores típicos dos componentes do BOS (do inglês *Balance of Systems*), ou seja, o conjunto dos restantes componentes necessários ao sistema, e também baseado em recomendações de entidades oficiais ligadas ao setor fotovoltaico de vários países, por exemplo IDAE (2011), foi previsto um valor de perdas dos restantes componentes do sistema de 25%, numa perspetiva conservadora face aos atuais valores típicos de rendimentos dos diferentes componentes do sistema, tais como os inversores, as cablagens (desde que corretamente dimensionadas), os díodos, se estiverem presentes, e restantes equipamentos.

É desta abordagem que surge o valor total diário da energia efetivamente injetada na rede, W_T , que pode compensar, em parte a ser determinada, os consumos energéticos dos edifícios considerados. A fórmula usada é:

$$W_T = W_d \times 0,65/10^3 \quad [\text{kWh}] \quad (55)$$

Este valor é o total de energia injetada na rede pelo sistema fotovoltaico do edifício ao longo do dia considerado para o cálculo.

O código criado para o cálculo da potência de saída dos módulos e da energia produzida, passou a ser parte do software de simulação dinâmica de edifícios, num processo em que se pretende fazer evoluir o programa também para poder simular de forma combinada a avaliação térmica e a aplicação de soluções de fontes de energias renováveis, o que representou desde o início deste estudo um objetivo fundamental do presente trabalho.

A produção de energia elétrica dos módulos pode ser afetada por vários fatores. Antes de incidir nos módulos, a radiação solar pode ser atenuada com a deposição de sujidade nos módulos, como o pó, os dejetos de aves, as folhas de árvores, ou pelo surgimento de sombras na zona dos painéis devidas a edifícios próximos, árvores e outras barreiras arquitetónicas, até mesmo de outros módulos, em determinadas alturas do dia.

Devido à necessidade de obter tensões mais elevadas do que aquelas que estão disponíveis nos módulos é necessário ligá-los em associações série, paralelo ou mista, produzindo perdas pela desigualdade dos módulos (“mismatch”), devendo-se selecionar um único tipo de módulo para cada instalação, ou pelo menos para cada ramo ou fileira de painéis (Rosendo, 2010).

Ainda devem ser tidas em conta as perdas nos cabos elétricos, devidas ao efeito de Joule, cuja potência de perdas é dada pelo produto da resistência elétrica dos cabos pelo quadrado da intensidade de corrente. Também ocorrem perdas no inversor e transformador, quando estes fazem parte do sistema, e aquelas decorrentes das tolerâncias (desvios) nos valores nominais apresentados pelo fabricante. O módulo degrada-se ao longo do tempo, causando mais perdas, e ainda podem ocorrer perdas por alta temperatura para módulos próximos ou integrados numa montagem em telhados, devidas ao aquecimento (ALTENER, 2004).

Estes fatores são muito variáveis, dependendo em larga medida da estação do ano, da técnica de montagem, da localização geográfica, da inclinação do painel, e ainda do azimute. O azimute é o ângulo formado pela direção sul e a direção para a qual o módulo está virado, no hemisfério Norte, sendo a referência a direção norte, no caso de localizações no hemisfério Sul (Lorenzo, 2003).

Para instalações fixas, isto é, sem sistema de seguimento solar (*sun tracking*), como o caso em estudo, que visam maximizar a produção em termos anuais, o azimute ótimo é 0°, ou seja, os módulos devem estar virados a sul, porque a instalação se encontra no hemisfério Norte.

O facto de se dispor do conjunto de valores da temperatura ambiente e da radiação solar ao longo de um dia permite seguir este procedimento, em que são incluídos nos cálculos os efeitos combinados da variação do valor da radiação incidente nas células e da temperatura ambiente, esta refletida no valor da temperatura da célula. Os valores da potência gerada foram calculados a cada intervalo de 15 minutos, permitindo obter valores mais precisos para as condições ambientais presentes nos dias considerados nas simulações.

Este cálculo, no entanto, não deve ser extrapolado para obter valores mensais, nem anuais, situação que acarretaria erros eventualmente não desprezáveis. Para tal fim, deveriam ser usadas bases de dados com valores estatísticos de radiação e temperatura como os presentes em PVGIS (2012) (*Photovoltaic Geographical Information System*), onde podem ser obtidos valores médios mensais e anuais que facilitam a estimação dos valores de energia produtível.

2.10.2.6 Distribuição dos módulos fotovoltaicos

O objetivo primordial da produção de energia elétrica para autoconsumo é obter a maior produção possível, com as áreas disponíveis.

Para alcançar este objetivo numa instalação fotovoltaica é necessário acautelar, à partida, três questões importantes:

- A inclinação dos painéis em relação ao solo ou pavimento;
- A orientação dos painéis em relação ao sul (azimute);
- A distância a manter entre os grupos de painéis.

Existem vários métodos para a escolha da inclinação ótima para uma instalação solar fotovoltaica num dado local, quase todos baseados em dados estatísticos colhidos

durante vários anos, alguns deles disponíveis em sites da internet. Para calcular a inclinação ideal, geralmente representada pela letra β , para a instalação fotovoltaica nos edifícios estudados, foram utilizados dois procedimentos diferentes.

Um procedimento possível consiste numa consulta ao PVGIS (2012), onde se pode escolher a localização da instalação através de um mapa com coordenadas GPS, e obter a inclinação ótima anual para o local, e outros dados, como, por exemplo, a radiação solar disponível para o local.

Outro método escolhido, apresentado em Lorenzo (2003), resulta de estudos estatísticos da correlação entre a latitude do local e a inclinação ótima para maximizar a produção anual de energia. Propõe a aplicação da seguinte equação:

$$\beta_{opt} = 3,7 + 0,69 \cdot |\phi| \quad (56)$$

Onde:

- β_{opt} é a inclinação ótima anual para o local [°];

- ϕ é a latitude do local [°].

A orientação ideal para uma instalação fotovoltaica cujo propósito é maximizar a produção energética é virada para sul (no hemisfério norte), logo com azimute (α) igual a zero. Outros tipos de aplicações podem adotar valores diferentes de azimute, conforme os horários onde se pretende obter mais potência, ou mais energia.

Com o objetivo de reduzir as perdas por sombreamento entre fileiras de painéis fotovoltaicos inclinados, há vários métodos, dos quais dois métodos empíricos são apresentados em Roriz, L. *et al.* (2010). Um deles considera a altura dos painéis, e o outro visa uma utilização ótima da área disponível.

Considerando a altura dos módulos, pode ser determinada a distância mínima, “ d ”, entre os grupos de módulos pela seguinte fórmula:

$$d = 3,5 \cdot h \quad (57)$$

Onde h é a altura dos módulos.

Para uma utilização otimizada da área, pode-se usar:

$$d = 2,25 \cdot b \quad (58)$$

Onde b é a largura do módulo.

Outro método que pode ser utilizado para evitar os sombreamentos pode ser o apresentado em IDAE (2011). Com o propósito de garantir pelo menos 4 horas de sol em torno do meio-dia do solstício de inverno, a distância mínima, d , entre fileiras de painéis ou entre uma fileira e um obstáculo, é obtida a partir da seguinte equação:

$$d = k \cdot h \quad (59)$$

Onde k é um fator adimensional, dependente da latitude do local, calculado pela seguinte equação:

$$k = \frac{1}{\tan(61^\circ - \phi)} \quad (60)$$

Onde ϕ é a latitude do local da instalação.

2.11 Bombas de calor geotérmicas

As bombas de calor são uma das tecnologias de aquecimento e arrefecimento mais maduras da atualidade, por serem altamente eficientes e tirarem partido de energia renovável (Fridleifsson, 2001). Em alguns casos podem ser utilizadas para a geração de eletricidade, nomeadamente quando há a disponibilidade de altas temperaturas.

Podem ser instaladas na maior parte dos tipos de edifícios e apresentam algumas vantagens em relação a outras alternativas no modo de arrefecimento, como os sistemas de cogeração ou CHP (*Combined Heat and Power*), e os sistemas solares térmicos ativos, devido à necessidade que estes apresentam de utilizar *chillers* termicamente conduzidos. A seu favor têm também o facto de não terem variações bruscas de temperatura no local de captação de energia, produzirem poucos resíduos e,

tal como as outras fontes endógenas de energia, ajudarem a reduzir a necessidade de importar combustíveis fósseis e a consequente dependência energética do exterior (Kim *et al.*, 2014).

Os inconvenientes que pode apresentar são a contaminação térmica, o impacte visual, a emissão de algum ácido sulfídrico (H_2S) e dióxido de carbono (CO_2), e a possível contaminação de águas próximas ao ponto de captação de energia com arsénio (As) e amoníaco (NH_3). Exigem um estudo cuidadoso do local da instalação e da escolha da tecnologia mais adequada para causar o mínimo impacte ambiental possível.

As bombas de calor podem mesmo ser consideradas o equipamento padrão para o arrefecimento dos espaços, em modo isolado. Os valores de potências comerciais das bombas de calor vão desde apenas 1 kW até potências na escala de alguns MW (Carrier, 2010). Apresentam grande modularidade, permitindo, em edifícios de maiores dimensões, a instalação de múltiplas unidades com o objetivo de melhorar a flexibilidade operacional, a eficiência global do edifício pela otimização da sua operação e, além disso, servir como elemento de apoio ou de redundância.

Nos climas frios, como nos Estados Unidos da América, o consumo de energia em edifícios comerciais para arrefecimento e ventilação representa cerca de 13% (US DOE/EERE, 2009) e a utilização da bomba de calor é mais importante em termos do funcionamento em modo de aquecimento. Num clima temperado como o da região do Algarve, a sua aplicação é ainda mais importante no modo de arrefecimento. Daí resultou a escolha que foi feita de simular sistemas com bomba de calor para fornecer água às superfícies radiantes para arrefecer os compartimentos.

Os sistemas geotérmicos podem ser classificados em abertos ou fechados, conforme a composição do circuito do permutador de calor que recolhe o calor proveniente da geotermia Kim *et al.* (2014).

2.11.1 Tipos de sistemas

Sistemas abertos

Num sistema aberto as tubagens que transportam a água fornecida pelas fontes subterrâneas e freáticas são aplicadas a uma bacia recetora com água efluente.

Sistemas fechados

Se a água circula no interior da tubagem que recolhe por permuta o calor geotérmico, então o sistema é classificado como fechado, ou de malha fechada. Os sistemas fechados, por sua vez, subdividem-se em sistemas verticais ou sistemas horizontais, conforme a colocação dos laços das tubagens.

Nos sistemas verticais as tubagens são instaladas de modo a entrar em contacto com diferentes profundidades. Nos sistemas horizontais, as tubagens estão num plano à mesma profundidade, como se pode observar na Figura 2.7. As profundidades de instalação das tubagens variam entre os 100 e os 150 metros nos sistemas de tipo vertical, e entre os 1,2 e 1,8 metros nos de tipo horizontal.

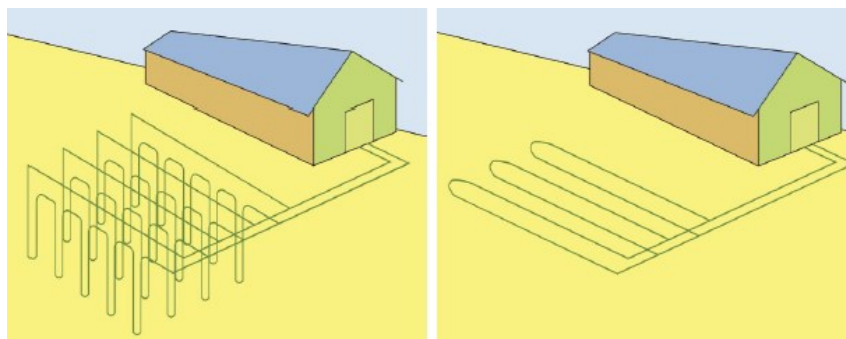


Figura 2.7: Sistemas de malha fechada vertical, à esquerda, e horizontal, à direita (Kim *et al.*, 2014).

2.11.2 Princípio de funcionamento

Para compreender o funcionamento das bombas de calor deve-se atender ao conceito físico conhecido como máquina térmica. As máquinas térmicas são dispositivos que convertem a energia interna em outras formas úteis de energia. Os exemplos mais conhecidos de máquinas térmicas são os motores de combustão, as turbinas a gás, entre outras.

O trabalho líquido realizado por uma máquina térmica ao transportar uma substância de trabalho através de um processo cíclico, em que a variação da energia interna do sistema é nula ($\Delta E_{int} = 0$) é:

$$W = Q_H - Q_C \quad (61)$$

Onde:

- Q_H é a energia absorvida dum reservatório quente;
- Q_C é a energia expelida para um reservatório frio.

A eficiência térmica de uma máquina térmica é a razão entre o trabalho líquido realizado pela máquina durante um ciclo e a energia absorvida à maior temperatura durante esse ciclo:

$$e = \frac{W}{Q_H} = 1 - \frac{Q_C}{Q_H} \quad (62)$$

Onde:

- Q_H é o calor transferido para o reservatório quente [J];
- Q_C é o calor transferido para o reservatório frio [J];
- W é o trabalho consumido [J].

A eficiência térmica duma máquina térmica a trabalhar num ciclo de Carnot (máximo teórico) é:

$$e_c = 1 - \frac{T_C}{T_H} \quad (63)$$

- e_c é a eficiência térmica da máquina térmica [-];
- T_H é a temperatura do reservatório quente [K];
- T_C é a temperatura do reservatório frio [K].

Os frigoríficos e as bombas de calor são máquinas térmicas que funcionam no processo inverso, ou seja, num frigorífico ou bomba de calor, a máquina absorve energia Q_C de um reservatório (fonte) frio e expõe energia Q_H para um reservatório quente, como se observa na Figura 2.8, o que é alcançado somente se for consumido trabalho na máquina.

Da primeira lei da termodinâmica, sabe-se que a energia entregue à fonte quente deve ser igual à soma do trabalho consumido e da energia absorvida da fonte fria.

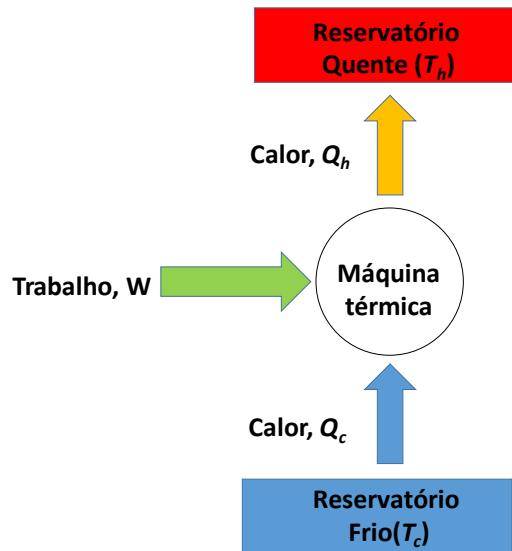


Figura 2.8: Funcionamento da máquina térmica em processo inverso, como frigorífico ou bomba de calor.

Na prática, seria ideal realizar este processo com um mínimo de trabalho consumido. Não é possível realizar o processo sem consumir trabalho, em termos das leis físicas que o regem.

2.11.3 Conceito de COP

A eficiência de uma bomba de calor real é geralmente avaliada pelo seu coeficiente de performance (COP), do inglês *Coefficient of Performance* (Carrier, 2010). No modo de aquecimento, o COP é definido como a razão entre a energia transferida para o reservatório quente e o trabalho realizado, necessário para transferir essa energia:

$$\text{COP}_H = \frac{Q_H}{W} \quad (64)$$

Onde:

- COP_H é o COP em modo de aquecimento, [-];
- Q_H é o calor transferido para o reservatório quente, [J];
- W é o trabalho consumido, [J].

Os valores típicos do COP para as bombas de calor são maiores que a unidade (Kreider, 2001). Se o COP para uma bomba de calor for 4, isto significa que a quantidade de energia transferida é 4 vezes maior que o trabalho realizado pelo motor da bomba de calor (Carrier, 2010). O COP pode cair abaixo da unidade, dependendo da relação entre as temperaturas no exterior e no interior do espaço a climatizar. No caso das bombas de calor geotérmicas, que usam o sistema água-água, o COP geralmente está entre 3,0 e 5,0 (Milenic *et al.*, 2009). A energia elétrica necessária para o funcionamento de um sistema AVAC que utilize este princípio pode ser calculada pela seguinte fórmula:

$$W_{elétrica} = \frac{Q_{térmica\ fornecida}}{COP} \quad (65)$$

Onde:

- $W_{elétrica}$ é a energia elétrica necessária [kWh];
- $Q_{térmica\ fornecida}$ é o calor transferido para o reservatório quente, [kWh];

Uma bomba de calor é um aparelho que, atuando como frigorífico, pode aquecer uma casa extraíndo calor do exterior, realizando um certo trabalho e descarregando calor para o interior da casa. Em modo de arrefecimento, o que se obtém é a energia removida do reservatório, ou seja, da água que circulou pelo solo (no interior de um tubo). O COP destas máquinas é definido em termos de Q_C , pela seguinte equação:

$$COP_C = \frac{Q_C}{W} \quad (66)$$

Onde:

- COP_C é o COP em modo de arrefecimento [-];
- Q_C é o calor transferido para o reservatório frio [J];
- W é o trabalho consumido [J].

Na prática utiliza-se a unidade kWh (correspondente a 3×10^6 J) em lugar do Joule, porque esta última é demasiado pequena. O COP em modo de arrefecimento é

geralmente referido nos regulamentos, tais como o SCE (2013), como EER, da terminologia inglesa *Energy Efficiency Rate*. O SCE (2013) também define as classes de eficiência para aparelhos de AVAC comerciais do tipo *multisplit*, a título de exemplo, de acordo com a seguinte tabela:

Tabela 2.6: Classificação energética para valores de EER e COP para aparelhos do tipo *multisplit*.

Classe Energética para arrefecimento	EER	Classe Energética para aquecimento	COP
A	> 3,20	A	COP > 3,60
B	3,20 ≥ EER > 3,00	B	3,60 ≥ COP > 3,40
C	3,00 ≥ EER > 2,80	C	3,40 ≥ COP > 3,20
D	2,80 ≥ EER > 2,60	D	3,20 ≥ COP > 2,80
E	2,60 ≥ EER > 2,40	E	2,80 ≥ COP > 2,60
F	2,40 ≥ EER > 2,20	F	2,60 ≥ COP > 2,40
G	2,20 ≥ EER	G	2,40 ≥ COP

As metodologias de controlo dos sistemas AVAC descritas no ponto 2.6 determinam os valores da potência térmica necessária ao seu funcionamento. Em 2.10.2.5, o modelo matemático aplicado aos sistemas fotovoltaicos determina os valores de potência elétrica de saída, em cada momento. Mas para avaliar os consumos, no primeiro caso, e a produção, no segundo caso, é necessário determinar a energia consumida ou gerada ao longo do dia. A energia corresponde ao integral da potência em ordem ao tempo, como indica a seguinte fórmula:

$$W = \int_{t_1}^{t_2} P \, dt \quad (67)$$

Onde:

- W é a energia [Wh];
- P é a potência [W];
- t é o tempo [h], desde o instante inicial t_1 , ao final t_2 , com $\Delta t = t_2 - t_1$.

De acordo com a equação (65), se a potência permanecer constante no intervalo de tempo de integração, a energia W pode ser determinada pelo produto do valor da

potência durante o intervalo, pelo valor do intervalo de tempo, dispensando o processo de integração:

$$W = P \times \Delta t \quad (68)$$

Onde:

- Δt é o intervalo de tempo do programa [h];
- W é a energia [Wh];
- P é a potência térmica [W].

3 Caso de estudo e metodologia aplicada

Neste capítulo são apresentados os edifícios estudados e é feita a sua caracterização, e são descritas as diferentes metodologias utilizadas para o desenvolvimento do trabalho, tais como:

- O modelo numérico do programa que serviu de ferramenta para a realização das simulações de radiação solar, conforto térmico e consumos de energia térmica dos sistemas AVAC e da energia produzida pelos sistemas fotovoltaicos;
- Os modelos tridimensionais dos edifícios;
- Os dados de entrada das diferentes simulações;
- Os tipos de sistemas AVAC utilizados;
- O uso de superfícies radiantes alimentadas por bombas de calor geotérmicas;
- O modo como foram determinados os valores dos consumos energéticos (elétricos) dos edifícios através dos dados obtidos com o sistema de medições implementado nos edifícios do Campus da Penha.
- O procedimento utilizado na previsão da produção dos sistemas fotovoltaicos a instalar nas coberturas dos edifícios.

O objeto de estudo desta tese é um conjunto de seis edifícios do Campus da Penha, em Faro, Portugal, um dos campus da Universidade do Algarve, onde se desenrolam as atividades do ensino superior politécnico.

O Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE, 2006), expresso no Decreto-Lei n.º 80/2006, de 4 de abril, estabelece uma distribuição dos concelhos de Portugal em zonas climáticas. A cidade de Faro situa-se na zona

climática designada por I1 de Inverno e V2-S de verão, no extremo sul de Portugal, a uma latitude de 37 °N e uma longitude de 7,9 °W.

Na região algarvia, os invernos são mais suaves e pouco prolongados, com menos precipitação do que em outras zonas localizadas mais a Norte, o que significa um maior número de dias de céu limpo, além de dias mais longos, permitindo alcançar maiores produtividades com os sistemas de produção energética baseados na radiação solar, como os fotovoltaicos e os solares térmicos.

Os verões são mais temperados do que em outras regiões a norte, apresentando menos precipitação e amplitudes térmicas mais reduzidas, favorecendo ainda assim a captação de energia solar.

3.1 Caracterização dos edifícios

O campus objeto deste estudo, situado no bairro da Penha, próximo da saída norte da cidade, engloba vários edifícios que são utilizados para lecionar os cursos do Ensino Superior Politécnico da Universidade do Algarve.

Alguns dos edifícios do campus não foram englobados neste estudo, tais como a biblioteca da Penha, concluída após o início dos trabalhos, nem o edifício do jardim-de-infância, as oficinas dos Serviços Técnicos, o edifício de Engenharia Civil e a residência oficial do Reitor.

Os seis edifícios que foram estudados são as instalações da Escola Superior de Gestão, Hotelaria e Turismo, o edifício da Escola Superior de Educação e Comunicação, os dois edifícios do Instituto Superior de Engenharia, os dois edifícios do Complexo Pedagógico da Penha e do edifício dos Serviços de Ação Social.

Na Figura 3.1 pode-se observar uma planta do campus, que permite ver a localização relativa dos diversos edifícios neles situados.

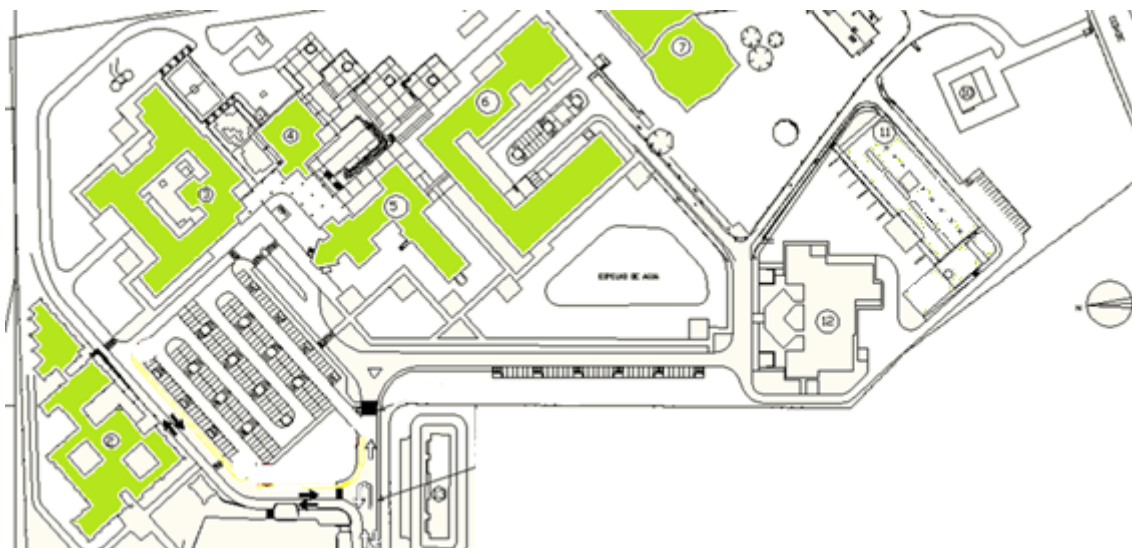


Figura 3.1: Esquema do Campus da Penha, com os edifícios estudados preenchidos a verde (Serviços Técnicos da UAlg).

A Figura 3.2 apresenta uma vista de satélite do campus.



Figura 3.2: Vista de satélite do Campus da Penha (Google)

Os modelos tridimensionais dos edifícios estudados foram inicialmente desenvolvidos em trabalhos anteriores, Silvestre e Silva (2007) e Conceição E. (2008), sendo revistos e atualizados. Foram realizados outros trabalhos preliminares onde se aplicou a metodologia utilizada no presente trabalho, e produzidos artigos, nomeadamente, Conceição *et al.* (2014a), Conceição *et al.* (2014b) e Conceição *et al.* (2012b), e Conceição *et al.* (2019) sobre a implementação dos sistemas de controlo aplicados aos sistemas AVAC.

Os edifícios são todos construídos com paredes exteriores duplas de cerca de 30 cm de espessura em alvenaria, com isolamento e reboco. As paredes interiores são simples, apenas com reboco, sem isolamento, com uma espessura aproximada de 15 cm. As portas e janelas têm caixilharia metálica e vidros duplos, exceto no ESGHT, em que alguns dos vidros ainda são simples. Têm cobertura horizontal, com camada de isolamento.

Escola Superior de Educação e Comunicação

O edifício Escola Superior de Educação e Comunicação inclui gabinetes, salas de aulas, laboratórios, corredores, arrecadações e casas de banho. Conta com um total de 108 compartimentos, distribuídos por 2 pisos, dentre os quais 40 são gabinetes e 16 salas de aulas teóricas, laboratórios e salas de informática, que são constituídos por 1481 corpos opacos, tais como paredes interiores e exteriores, placas, chão, telhado e portas, e 186 corpos transparentes (vidros das janelas).

Este edifício apresenta um pé direito médio de 3,2 m. A instalação é frequentada em média por 820 utilizadores por dia, durante pelo menos 260 dias por ano. O horário de funcionamento deste estabelecimento de ensino é das 8:00 às 23:00 horas.

A Figura 3.3 mostra o modelo tridimensional do edifício da Edifício da Escola Superior de Educação e Comunicação.

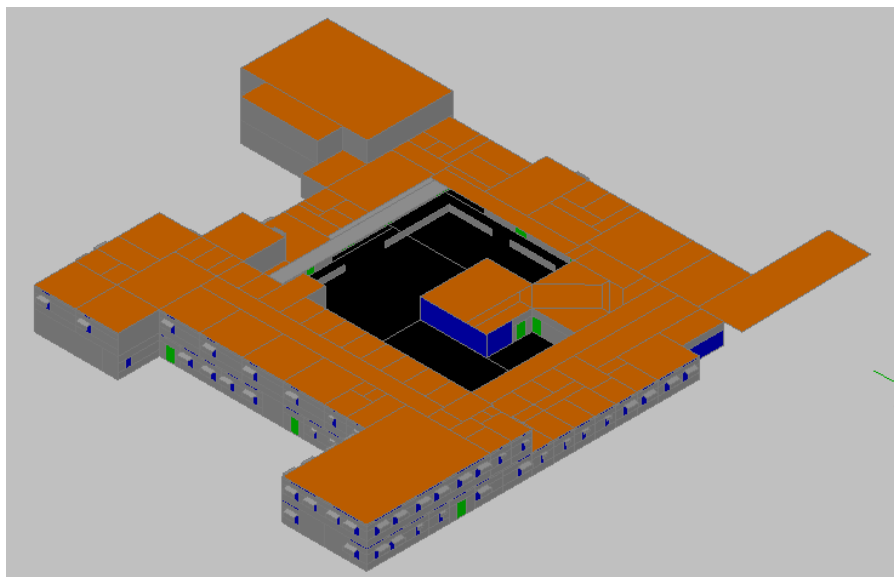


Figura 3.3: Edifício da Escola Superior de Educação e Comunicação (ESEC).

Na Figura 3.4 pode ser observada a estrutura do edifício da ESEC, e na Figura 3.5 a sua numeração dos compartimentos.

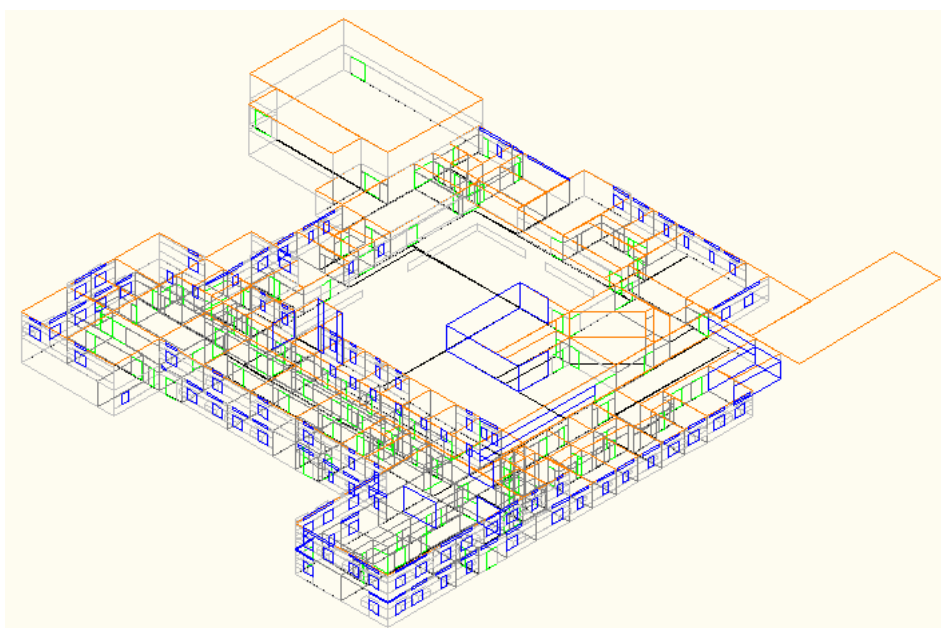


Figura 3.4: Estrutura do edifício da Edifício da Escola Superior de Educação e Comunicação.

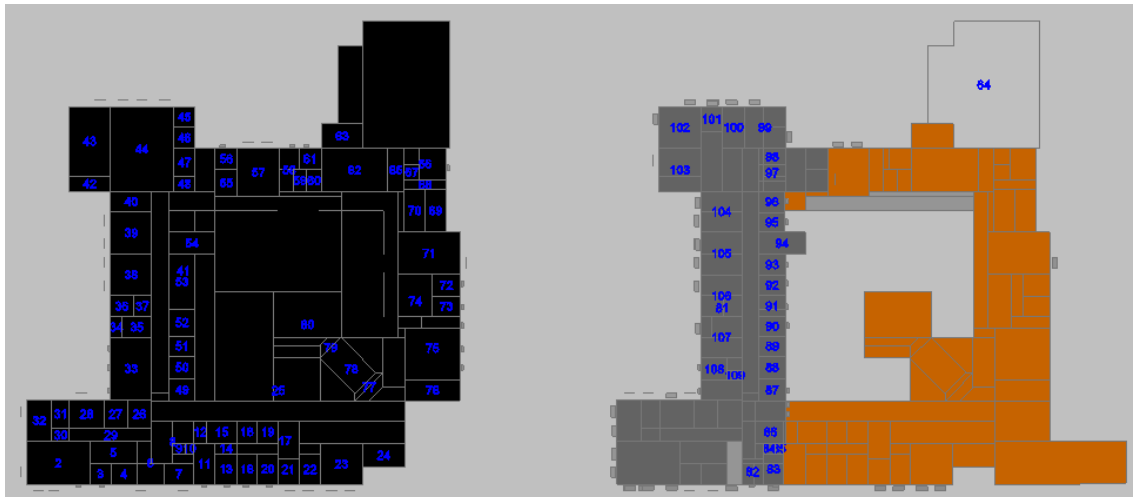


Figura 3.5: Esquema do edifício da ESEC com a numeração dos compartimentos: 1.º piso (à esquerda) e 2.º piso (à direita).

Escola Superior de Gestão, Hotelaria e Turismo

O edifício da Escola Superior de Gestão, Hotelaria e Turismo (ESGHT), inclui gabinetes, salas de aulas, laboratórios, corredores, arrecadações e casas de banho. Conta com um total de 124 compartimentos, distribuídos por 2 pisos, dentre os quais 40 são gabinetes e 16 são salas de aulas teóricas, laboratórios e salas de informática.

São constituídos por 1740 corpos opacos, tais como paredes interiores e exteriores, placas, chão, telhado e portas, e 201 corpos transparentes. Tem espaços interiores abertos, com muita entrada de radiação solar. O edifício tem dois pisos, com uma superfície total de 5199 m² e um pé direito médio de 3,2 metros. A cobertura deste edifício é horizontal, com isolamento. Este edifício está aberto para as suas atividades entre as 8:00 e as 23:00, tal como o da ESEC.

A Figura 3.6 mostra uma perspectiva da Escola Superior de Gestão, Hotelaria e Turismo, enquanto a Figura 3.7 mostra a sua estrutura.

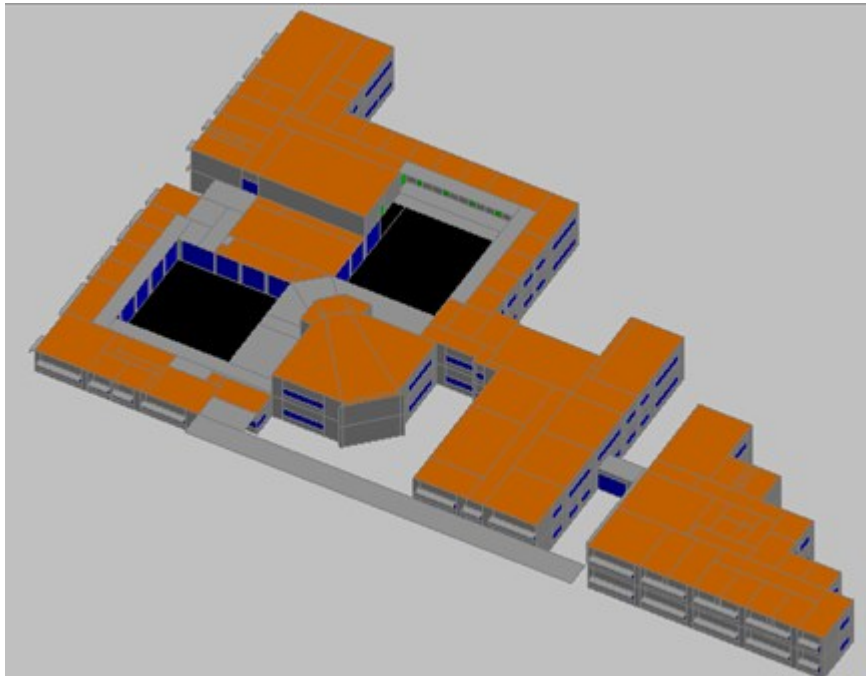


Figura 3.6: Edifício da Escola Superior de Gestão, Hotelaria e Turismo.

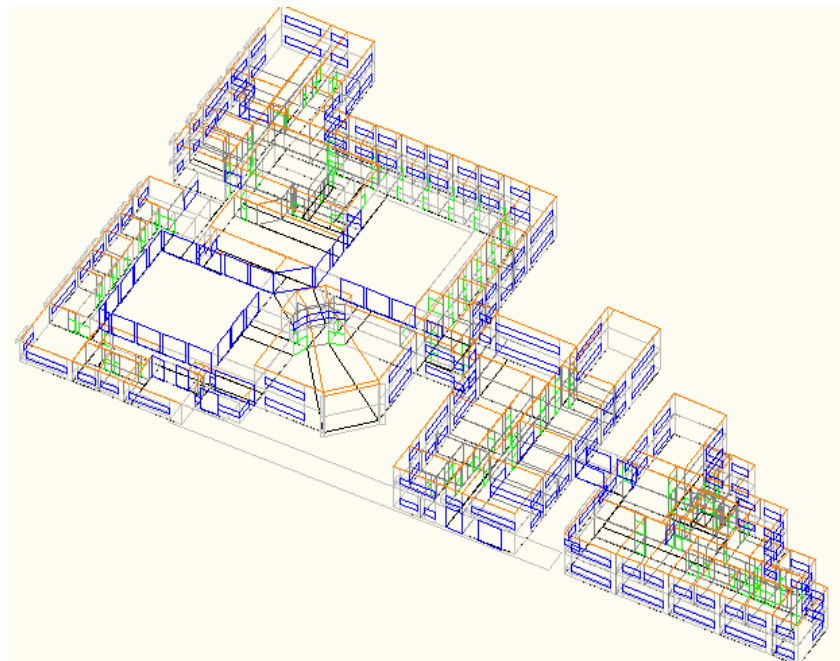


Figura 3.7: Estrutura do edifício da ESGHT.

A Figura 3.8 apresenta a numeração dos compartimentos do edifício da ESGHT, distribuídos pelos seus dois pisos.

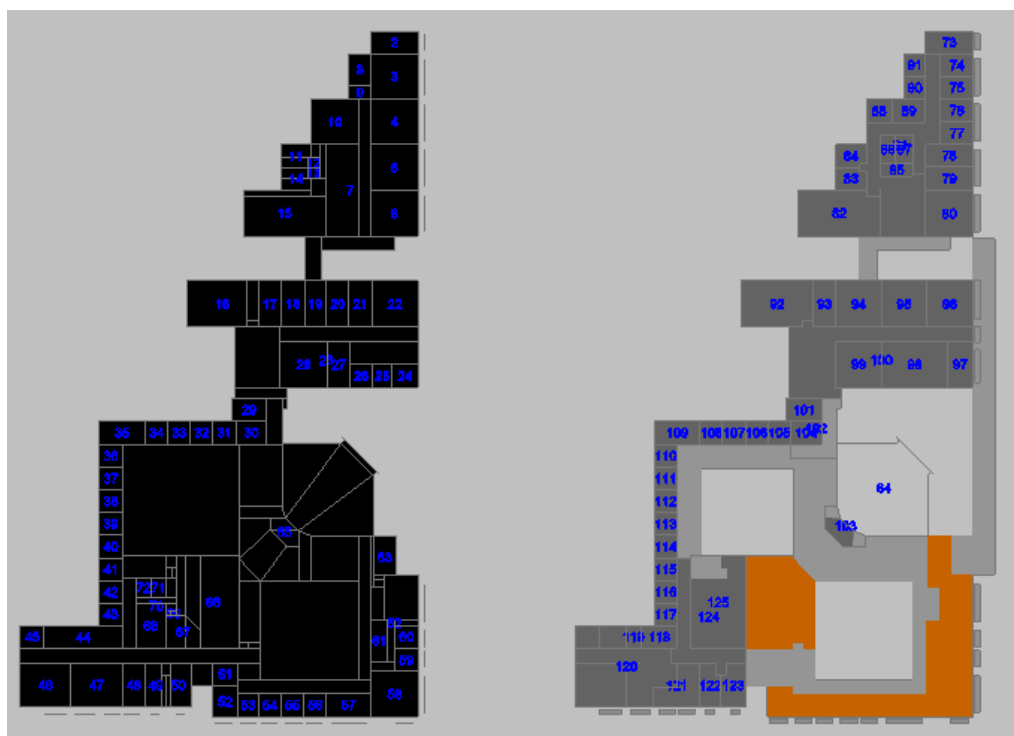


Figura 3.8: Numeração dos compartimentos do Edifício ESGHT, com o 1.º piso à esquerda e o 2.º piso à direita.

Edifício n.º1 do Instituto Superior de Engenharia (ISE 1)

É um dos dois edifícios construídos nas fases iniciais do antigamente designado Instituto Politécnico de Faro. Apenas numa fase posterior foi criada a Universidade do Algarve, que mais tarde viria a integrar o referido instituto no seu seio, passando a abarcar o ensino superior universitário, no Campus de Gambelas, e o ensino superior politécnico, que se manteve no Campus da Penha.

Este edifício, que tem um pé-direito de 3,3 m, inclui 333 compartimentos, incluindo gabinetes, salas de aulas, laboratórios, corredores, arrecadações e casas de banho. Conta com um total de 100 compartimentos, distribuídos por 3 pisos, dentre os quais 40 são gabinetes e 16 salas de aulas teóricas, laboratórios e salas de informática, que são constituídos por 1299 corpos opacos e 236 corpos transparentes.

Na Figura 3.9 está representada uma perspetiva do edifício n.º1 do Instituto Superior de Engenharia.

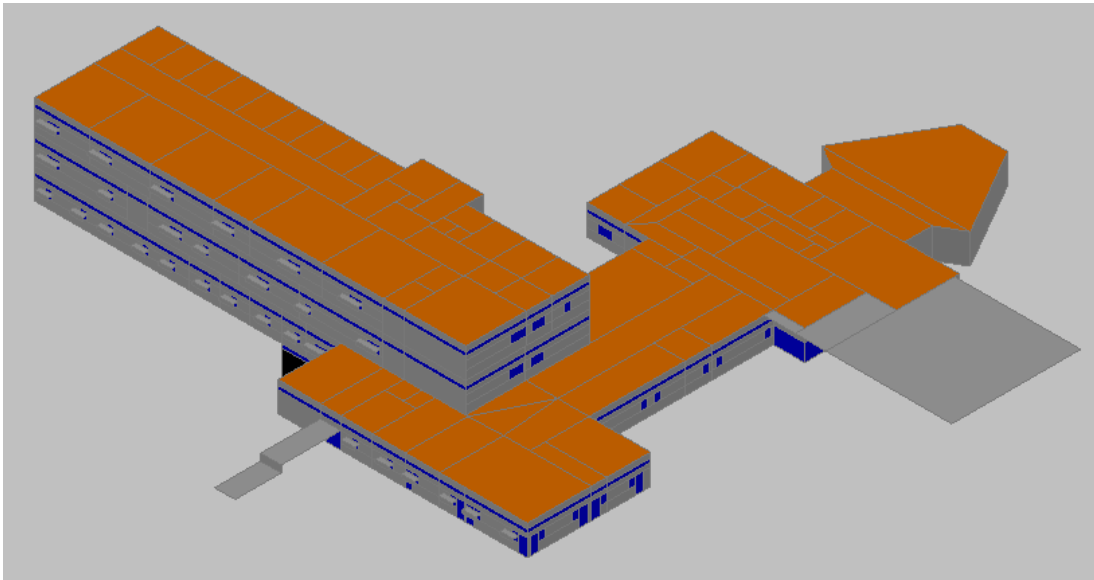


Figura 3.9: Edifício n.º1 do Instituto Superior de Engenharia.

A estrutura deste edifício pode ser observada na Figura 3.10.

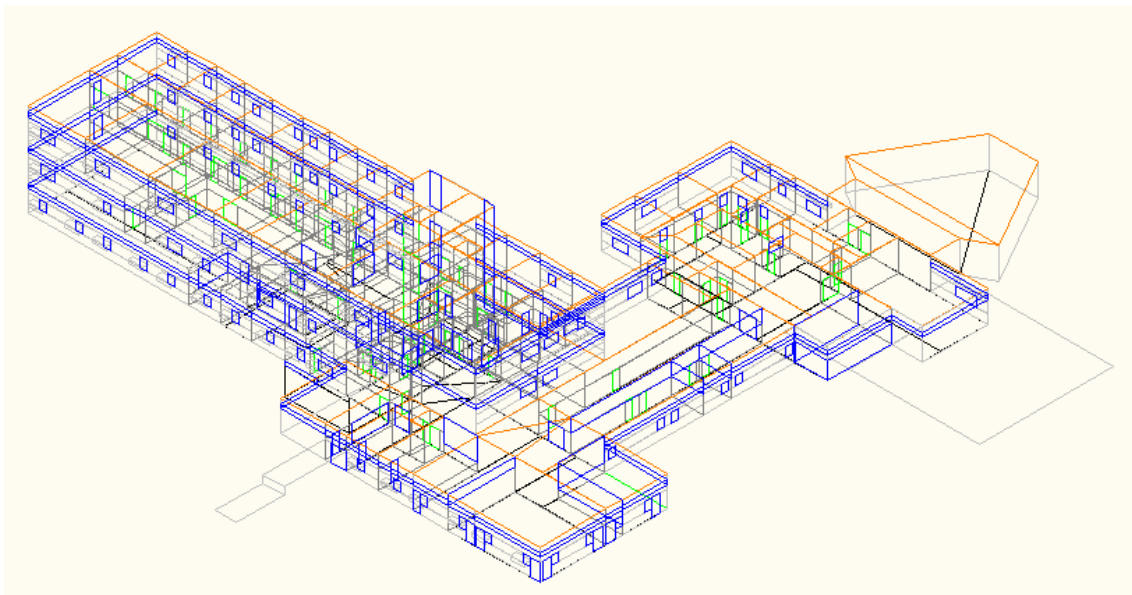


Figura 3.10: Estrutura do edifício n.º1 do Instituto Superior de Engenharia.

A numeração dos compartimentos deste edifício pode ser observada na Figura 3.11.

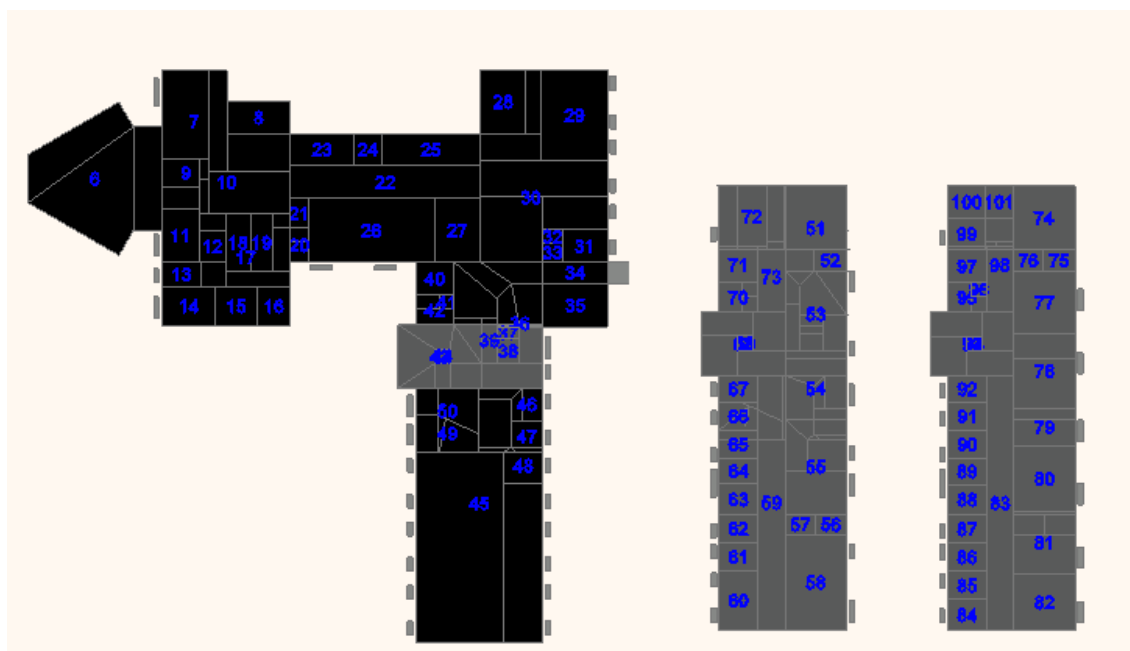


Figura 3.11: Numeração dos compartimentos do edifício n.º1 do Instituto Superior de Engenharia, com o piso 0 à esquerda, o piso n.º1 ao centro e o piso n.º2 à direita.

Edifício n.º2 do Instituto Superior de Engenharia (ISE 2)

O edifício número 2 do ISE inclui 333 gabinetes, salas de aulas, laboratórios, corredores, arrecadações e casas de banho. Conta com um total de 95 compartimentos, com 40 gabinetes e 16 salas de aulas teóricas, laboratórios e salas de informática, que são constituídos por 1247 corpos opacos e 182 corpos transparentes. Possui um pé-direito médio de 3,3 m.

O modelo do edifício do Instituto Superior de Engenharia 2 pode ser observado na Figura 3.12.

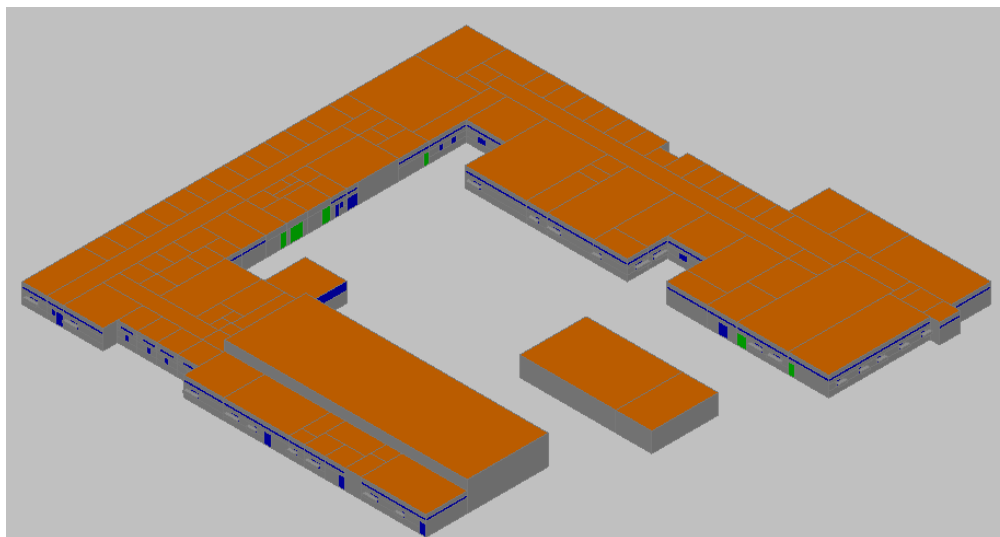


Figura 3.12: Edifício n.º2 do Instituto Superior de Engenharia.

A Figura 3.13 mostra uma vista da estrutura do edifício n.2 do Instituto Superior de Engenharia.

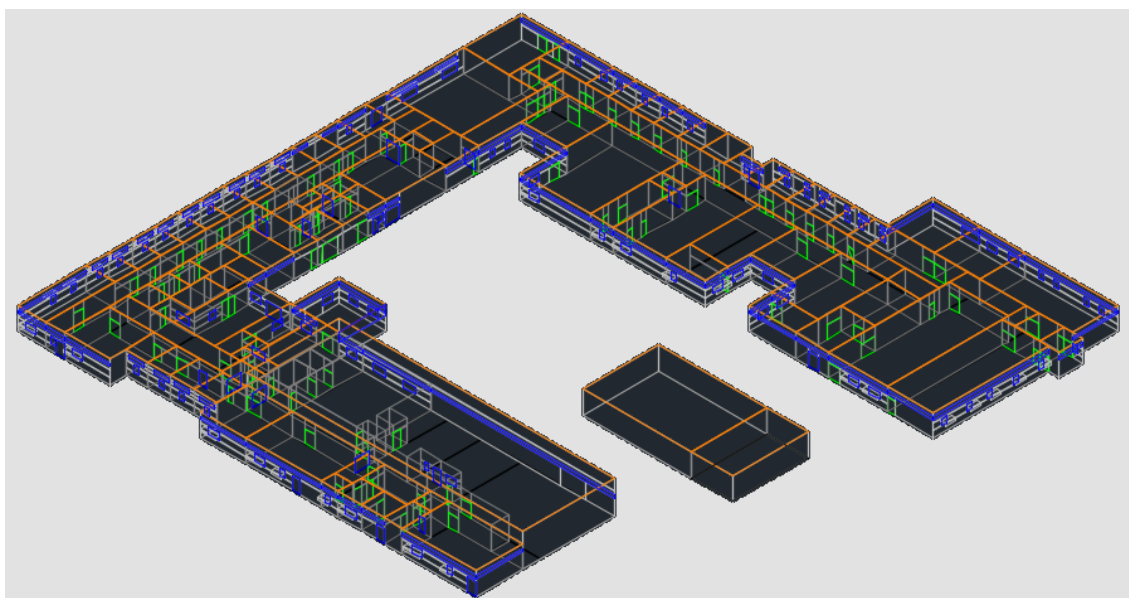


Figura 3.13: Vista da estrutura do edifício n.º2 do Instituto Superior de Engenharia.

Na Figura 3.14 pode ser vista a numeração dos compartimentos do mesmo edifício.

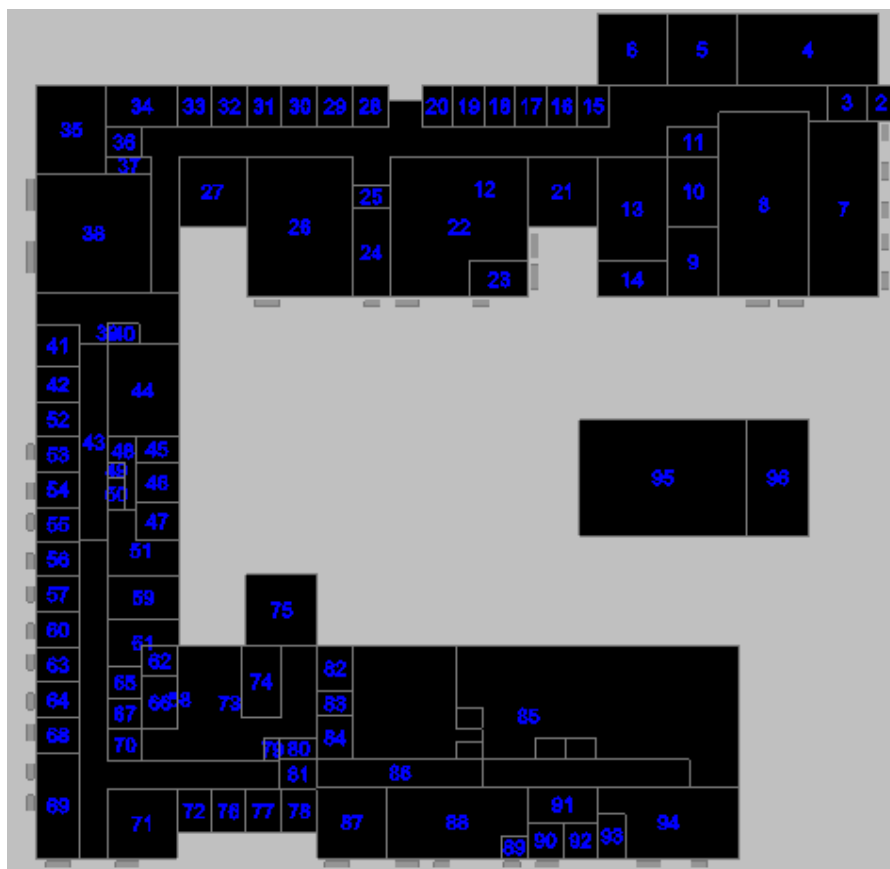


Figura 3.14: Numeração dos compartimentos do edifício n.º2 do Instituto Superior de Engenharia.

Edifícios do Complexo Pedagógico da Penha (CP)

Estes edifícios contam com um total de 88 compartimentos, distribuídos por 2 edifícios, um dos quais com anfiteatros, onde são lecionadas aulas, e decorrem diversos eventos, tais como sessões de formação, seminários ou assembleias académicas. São constituídos, neste estudo, por 1294 corpos opacos e 77 corpos transparentes, com um pé-direito médio de 3,3 m.

Os edifícios encontram-se ligados um acesso do tipo ponte metálica, estando, de resto, fisicamente separados, e têm características bastante distintas. Aquele que tem um formato mais quadrado é ocupado por vários anfiteatros, distribuídos por dois pisos, enquanto o retangular é constituído por salas de aulas tradicionais. Este edifício foi construído, como o próprio nome indica, para ser utilizado principalmente para as atividades letivas. O piso inferior do edifício de salas é utilizado como garagem.

A Figura 3.15 apresenta uma perspectiva do Complexo Pedagógico, com os seus dois edifícios unidos apenas por uma ponte.

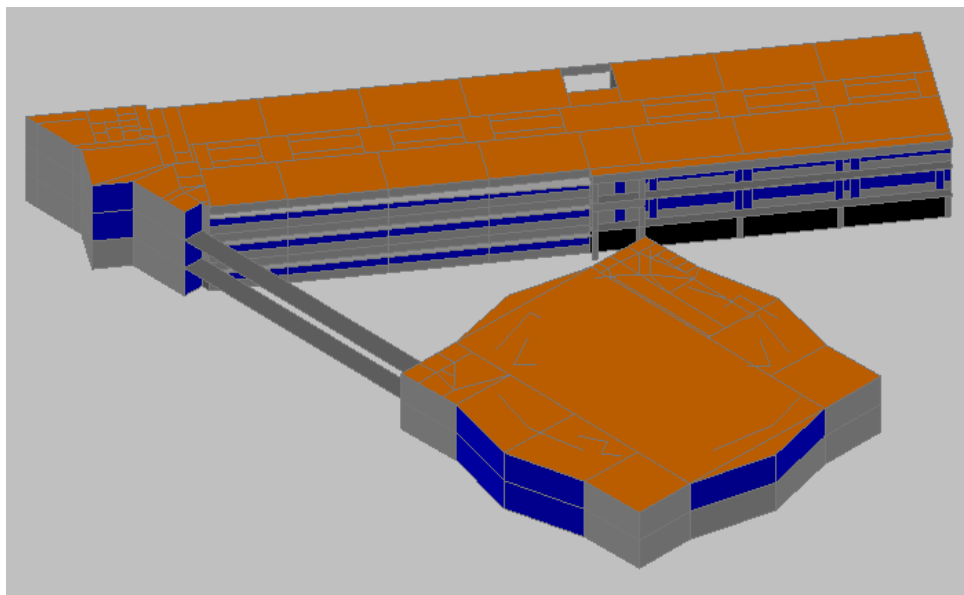


Figura 3.15: Modelo tridimensional do Complexo Pedagógico, em perspectiva.

A estrutura do Complexo Pedagógico é apresentada na Figura 3.16.

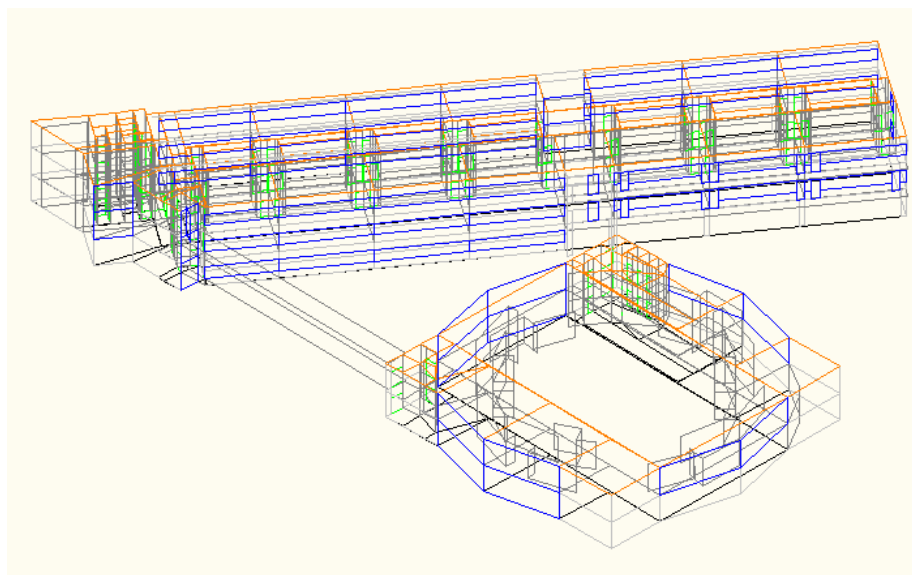


Figura 3.16: Estrutura do edifício do Complexo Pedagógico.

A numeração dos compartimentos dos edifícios do Complexo Pedagógico é mostrada na Figura 3.17.

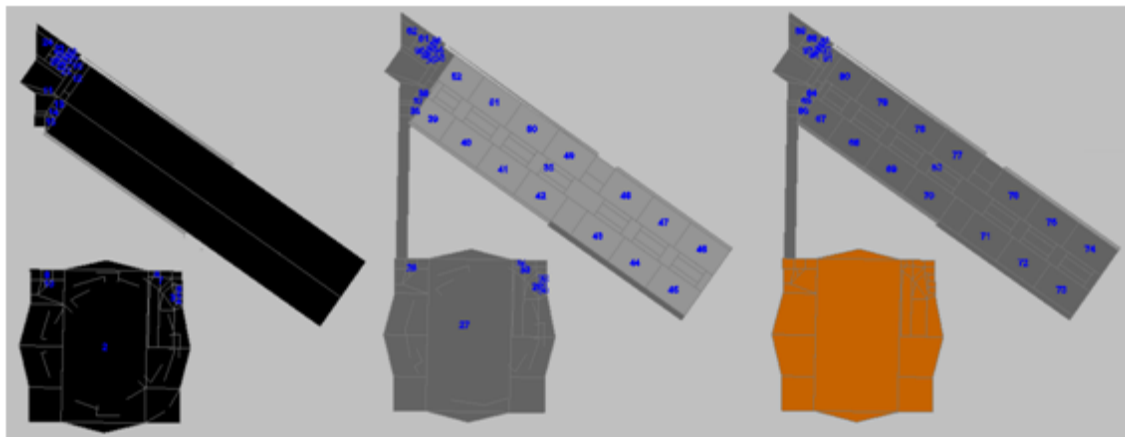


Figura 3.17: Numeração dos compartimentos do edifício do Complexo Pedagógico, com o piso 0 à esquerda, piso n.º1 ao centro e piso n.º2 à direita.

Edifício dos Serviços de Ação Social (SAS)

Este edifício difere muito de todos os restantes, por não incluir salas de aula, possuindo apenas espaços destinados a funções de carácter administrativo, tais como gabinetes, salas de reunião, secretarias, arquivos, arrecadações e casas de banho. O pé-direito é de 3,2 m.

No piso inferior há um restaurante e uma pequena livraria/papelaria, e no piso imediatamente acima deste está a cantina. Conta com um total de 80 compartimentos, distribuídos por 3 pisos, entre os quais 40 são gabinetes e 16 secretarias, que são constituídos por 949 corpos opacos e 101 corpos transparentes.

Recentemente foi acrescentado um centro de cópias, que não está incluído neste estudo e contribuiu muito para alterar os perfis de consumos dos sistemas AVAC (e elétricos globais) deste edifício.

O edifício dos Serviços de Ação Social, no seu modelo em perspetiva, está representado na Figura 3.18.

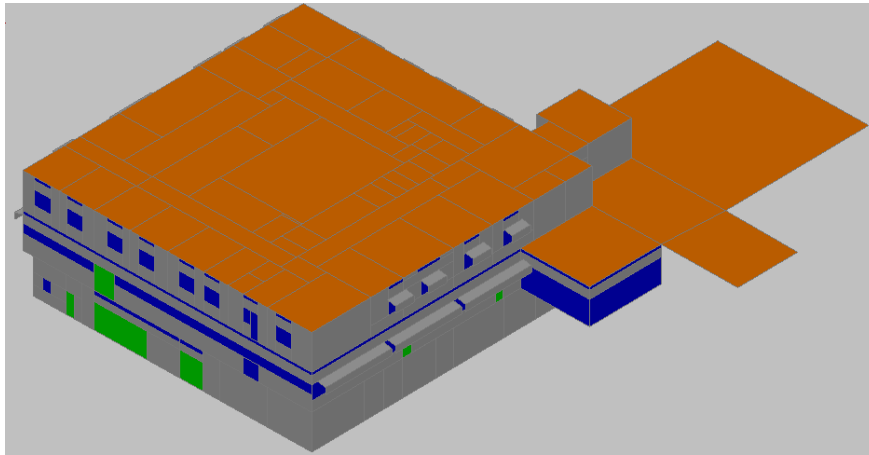


Figura 3.18: Edifício dos Serviços de Ação Social (SAS - antiga Reitoria).

A estrutura do edifício dos Serviços de Ação Social pode ser observada na Figura 3.19.

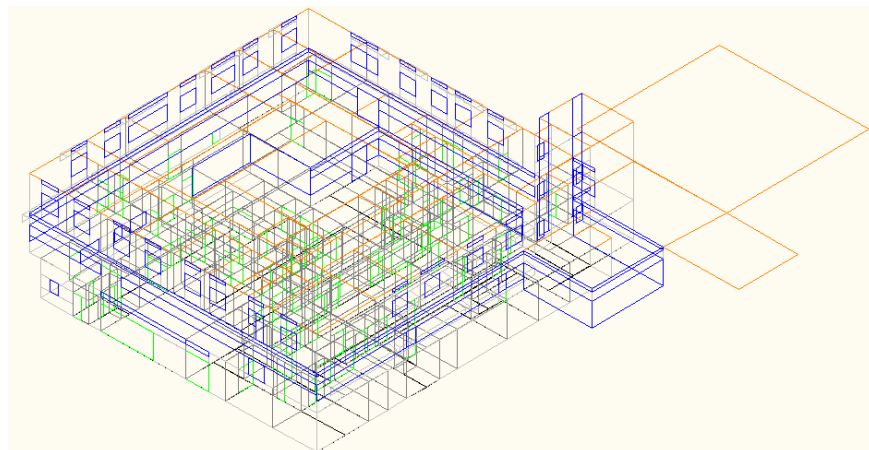


Figura 3.19: Estrutura do Edifício de Serviços de Ação Social.

A numeração escolhida para os compartimentos do edifício dos Serviços de Ação Social pode ser vista na Figura 3.20, para os seus três pisos.

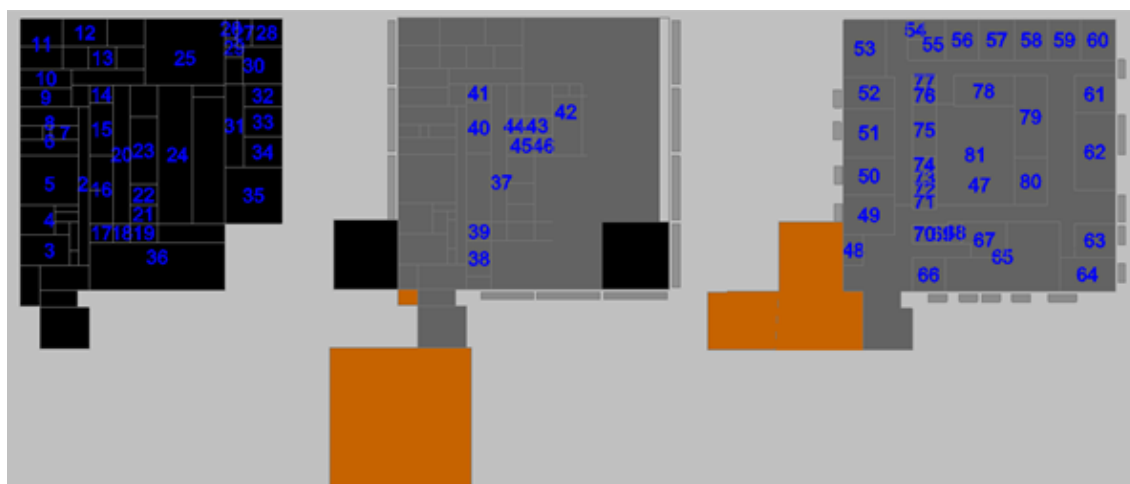


Figura 3.20: Numeração dos compartimentos do Edifício dos Serviços de Ação Social, com o piso 0 à esquerda, piso n.º1 ao centro e piso n.º2 à direita.

A Tabela 3.1 mostra uma compilação dos dados mais relevantes sobre os edifícios estudados.

Tabela 3.1 – Dados das simulações sobre os edifícios em estudo.

Edifício	Número de compartimentos	Nº de superfícies opacas	Nº de superfícies transparentes	Área total [m ²]
ESEC	108	1481	186	4725
ESGHT	124	1740	201	5199
ISE 1	100	1299	236	3539
ISE 2	95	1247	182	4370
CP	88	1294	77	7188
SAS	80	949	101	2578
TOTAIS	595	6529	983	27599

3.2 Metodologia utilizada

Este estudo foi realizado seguindo uma série de etapas previamente definidas, iniciando com a construção dos modelos dos edifícios em programa de desenho assistido por computador, com a finalidade de se obterem os dados da localização relativa de todas as superfícies, em todos os compartimentos.

Os períodos de ocupação foram definidos em função da observação dos horários de aulas típicos dos diversos cursos ministrados nos edifícios objeto de estudo, tendo-se decidido usar horários idênticos para todos os edifícios, correspondentes aos horários mais frequentes verificados.

Para as salas de aula, laboratórios e outros espaços ocupados, os valores de ocupação considerados foram obtidos por observação presencial dos mesmos, em período de lecionação de aulas, em três observações diárias, e calculado um rácio do número de alunos presentes pela ocupação completa prevista para cada sala. Aquando da realização destas observações, verificou-se que as presenças representavam cerca de metade, em média, da capacidade da cada sala, pelo que se utilizou este valor para todas as salas.

3.2.1 Modelos dos edifícios

Os modelos dos edifícios representam todas as partes dos edifícios da forma o mais fiel possível, em termos de todos os seus elementos constituintes e das suas dimensões, tais como as paredes exteriores e interiores, as portas e janelas, os pisos e as coberturas ou telhados. Todos os elementos são representados através de superfícies tridimensionais. As dimensões dos modelos correspondem às dos edifícios reais, obtidas também a partir de plantas fornecidas pelos Serviços Técnicos da Universidade do Algarve.

Numeração dos compartimentos

Na definição da numeração atribuída aos compartimentos o número 0 (zero) representa o ambiente exterior (ar) ao edifício, enquanto o número 1 representa o solo. Os compartimentos do edifício começam então a ser numerados a partir do número 2, procedendo-se à sua numeração de forma sequencial; o mesmo ocorre com as superfícies opacas e transparentes do edifício.

3.2.2 Dados de entrada

Nesta secção dos trabalhos serão apresentados os dados de entrada necessários para a realização das simulações.

Os modelos dos edifícios construídos em programa de desenho assistido por computador introduzem as características dos diversos corpos opacos e transparentes do edifício. As paredes exteriores são duplas, e as interiores são simples, estando associadas a diferentes valores de resistência térmica. O programa considera sempre vidros simples de 4 mm, embora a maioria dos edifícios reais estudados já disponham de vidros duplos.

São indispensáveis outros tipos de dados, referentes aos compartimentos. Nesta secção são apresentadas várias tabelas com os dados a introduzir no programa. São introduzidas várias matrizes de dados com os números de ocupantes e ciclos de ocupação dos edifícios, os períodos de funcionamento dos sistemas AVAC e os caudais de ventilação especificados.

São dados iniciais necessários os seguintes parâmetros:

- Corpos opacos e transparentes, exteriores e interiores;
- Temperatura do ar nos espaços interiores;
- Temperatura dos tubos instalados nas superfícies radiantes;
- Temperatura do ar nos tubos;
- Temperatura da terra.
- Massa de vapor nas superfícies;
- Massa de vapor absorvido pelos corpos.

No entanto, o programa tem incorporadas várias opções predefinidas com as condições de inverno e as condições de verão, evitando a necessidade da introdução destes dados de forma individual.

Ocupação

O programa necessita do número de pessoas presente em cada espaço, em cada intervalo de tempo predefinido, cujos valores são introduzidos na forma de uma matriz de ocupação. As coordenadas da matriz são os números dos compartimentos e os intervalos de tempo considerados, representando os períodos em que os espaços interiores têm uma ocupação constante, como foi considerado para o caso das aulas ou dos intervalos das aulas. Este trabalho foca-se em especial nas salas de aula e laboratórios, mas também se pretende verificar o comportamento diferenciado de uma secretaria, sabendo que a ocupação que lhes foi definida é diferente.

A ocupação foi obtida a partir de um estudo preliminar efetuado no conjunto dos edifícios estudados. Foram considerados níveis de ocupação médios e tidas em conta situações de permanência de pessoas nos corredores e zonas de passagem, a entrar ou sair dos edifícios. Um dos estudos que serviu de base a estes valores foi Conceição *et al.* (2009).

Deve-se salientar que as simulações calculam os valores dos parâmetros em análise neste trabalho para todos os compartimentos de todos os edifícios, sem exceção. No entanto, e apesar de terem sido analisados de forma preliminar todos os gráficos que mostram a evolução destes parâmetros, apenas serão apresentados 6 compartimentos neste documento, um por edifício.

Na Tabela 3.2 estão resumidos os dados de ocupação referentes às salas apresentadas para todos os edifícios, com a indicação da orientação predominante das superfícies envidraçadas entre parêntesis.

Tabela 3.2 - Evolução da ocupação dos compartimentos dos edifícios, para as salas apresentadas neste trabalho.

			Intervalos de tempo														
Edifício	Tipo de compartimento	Numeração dos compartimentos	0.00 - 8.30 h	8.30-10.00 h	10.00 - 10.15 h	10.15 - 11.45 h	11.45 - 12.00 h	12.00 - 13.30 h	13.30 - 13.45 h	13.45 - 15.15 h	15.25 - 15.30 h	15.30 - 17.00 h	17.00 - 17.15 h	17.15 - 18.45 h	18.45 - 19.00 h	19.00 - 20.30 h	20.30 - 24.00 h
			Número de ocupantes														
ESEC	Lab.	73 (E)	0	12	0	12	0	12	0	12	0	12	0	12	0	12	0
ESGHT	Aulas	10 (O)	0	15	0	15	0	15	0	15	0	15	0	15	0	0	0
ISE 1	Aulas	79 (E)	0	15	0	15	0	15	0	15	0	15	0	15	0	0	0
ISE 2	Lab.	75 (N)	0	12	0	12	0	12	0	12	0	12	0	12	0	12	0
CP	Aulas	77 (NE)	0	15	0	15	0	15	0	15	0	15	0	15	0	0	0
SAS	Secr.	62 (S)	0	4	4	4	4	0	0	4	4	4	4	0	0	0	0

Ventilação e caudais de ar novo necessários

Caudais de ventilação adequados são absolutamente fundamentais para assegurar a qualidade do ar interior, pela sua renovação constante e manutenção de baixos níveis de poluentes. De acordo com Pinto (2007) os métodos de construção dos edifícios têm evoluído ao longo do tempo, mas nem sempre no sentido de garantir as temperaturas do ar interior e a humidade relativa adequadas, provocando desconforto por qualidade do ar interior aos utilizadores dos edifícios.

Os dados que constam da matriz de ocupação dos espaços são utilizados nos cálculos dos caudais de ventilação necessários para a manutenção da qualidade do ar interior. Isto acontece porque os caudais de renovação de ar são proporcionais ao número de ocupantes, de acordo com as suas taxas metabólicas, e as consequentes emissões de dióxido de carbono.

De acordo com o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços (RECS, 2013), que estipula os requisitos legais de ventilação e qualidade do ar interior, define o limiar de proteção de CO₂ com o valor de 2250 mg/m³ de ar, ou 1.250 partes por milhão (ppm). Um dos métodos indicados no RECS (2013) para a determinação dos caudais mínimos de ventilação é o método prescritivo, que permite a determinação dos caudais de ar novo que garantem a diluição da carga poluente. A

carga poluente referida inclui a produzida pelos ocupantes do compartimento devida à taxa metabólica por eles desenvolvida e as emissões devidas aos materiais que compõem os revestimentos das superfícies do compartimento, além dos móveis e restantes objetos presentes.

No caso presente, atendendo a que havia alguns laboratórios e salas de desenho, a opção tomada foi no sentido de utilizar um valor único que respeitasse o regulamento, pelo que foi escolhido o valor de caudal de ar novo de $35 \text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{pessoa})$.

Quando o espaço está ocupado, o caudal mínimo aplicado a cada sala é calculado pelo produto do número de ocupantes previsto para o compartimento naquele intervalo de tempo pela taxa de renovação de ar de $35 \text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{pessoa})$. Quando as salas não estão ocupadas foram consideradas taxas de renovação de ar indicadas nas tabelas referentes a cada edifício, apresentadas a seguir. Os valores são calculados considerando uma renovação por hora, quando não há ocupantes. Estes caudais estão associados ao fluxo de ar novo que entra e sai em cada compartimento do edifício. Esta metodologia teórica, usada no programa numérico, pode ser implementada em termos práticos através de um sistema de condutas que transportam o ar novo para os espaços e outro sistema de condutas que transportam o ar velho para o ambiente exterior.

São apresentados na Tabela 3.3 os caudais de ventilação para os edifícios estudados, apenas para os compartimentos analisados nos resultados (Cap. 4.1), quando têm ocupação e quando estão desocupados.

Tabela 3.3: Caudais de ventilação aplicados nas salas apresentadas em cada edifício.

Edifício	Compartimento	Caudal (m^3/s)	
		Sem ocupação	Ocupado
ESEC	73	0,04023	0,11667
ESGHT	10	0,12705	0,14583
ISE 1	79	0,11932	0,14583
ISE 2	75	0,12693	0,11667
CP	77	0,19162	0,14583
SAS	62	0,03441	0,03889

Funcionamento dos sistemas de AVAC

O sistema AVAC, tanto em condições de verão como de inverno, entra em funcionamento quando o espaço está ocupado, e quando o ambiente está desconfortável. Para isso, é predefinida uma matriz, usando “OFF”, quando não existe ocupação, e “ON”, quando o espaço está ocupado.

A Tabela 3.4 mostra os valores da matriz de funcionamento do sistema AVAC para todos os edifícios. Pode-se verificar que aos intervalos de tempo em que não há ocupação (0 pessoas), corresponde o valor “OFF” na matriz de funcionamento do sistema AVAC. De modo semelhante, os intervalos em que há ocupantes coincidem com os intervalos em que a matriz de funcionamento tem o valor “ON”.

Tabela 3.4: Matriz de funcionamento dos sistemas AVAC.

Todos os edifícios	Intervalos de tempo														
	0.00 - 8.30 h	8.30-10.00 h	10.00 - 10.15 h	10.15 – 11.45 h	11.45 – 12.00 h	12.00 – 13.30 h	13.30 – 13.45 h	13.45 – 15.15 h	15,25 – 15.30 h	15.30 - 17.00 h	17.00 – 17.15 h	17.15 – 18.45 h	18.45 - 19.00 h	19.00 - 20.30 h	20.30 - 24.00 h
Tipo de compartimento	Estado de funcionamento do sistema AVAC														
Secretarias	OFF	ON	ON	ON	ON	OFF	OFF	ON	ON	ON	ON	OFF	OFF	OFF	OFF
Gabinetes	OFF	ON	ON	ON	ON	OFF	OFF	ON	ON	ON	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF
Salas de reuniões	OFF	OFF	OFF	ON	ON	OFF	OFF	OFF	OFF	ON	ON	OFF	OFF	OFF	OFF
Salas de aula	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	OFF	OFF
Laboratórios	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	OFF	OFF

Nível de vestuário e de atividade das pessoas

O programa calcula, de acordo com o número de ocupantes, o calor gerado pelos mesmos no interior dos compartimentos e o valor atribuído para a atividade metabólica utilizado foi de 1,2 met, ou seja, de 70 W/m² de área do ocupante. O índice de vestuário

considerado foi de 1 clo ($0,155 \text{ m}^2 \cdot \text{C}/\text{W}$), para o dia típico de inverno, e de 0,5 clo ($0,0775 \text{ m}^2 \cdot \text{C}/\text{W}$), para o dia típico de verão.

3.2.3 Sistemas de AVAC e radiantes simulados

Neste estudo serão realizadas simulações para três grupos distintos, em termos dos sistemas AVAC e radiantes utilizados. As simulações foram realizadas para as seguintes situações:

1. Com o sistema de AVAC desligado.
2. Com controlo do sistema AVAC por três diferentes algoritmos:
 - Sistema de controlo do índice de conforto térmico, PMV;
 - Sistema de controlo do índice de conforto térmico adaptativo, aPMV;
 - Sistema de controlo da temperatura preferida, TP.
3. Com sistemas que utilizam superfícies radiantes:
 - Todas as superfícies do compartimento são radiantes (tetos, pavimentos e paredes) alimentadas por bombas de calor geotérmicas, no verão.
 - Só as superfícies horizontais são radiantes, alimentadas por bombas de calor geotérmicas, no verão.
 - Só as superfícies horizontais são radiantes, alimentadas por coletores solares térmicos, no verão.

Foram assim realizadas, ao todo, sete simulações diferentes para cada edifício, visando obter os valores dos parâmetros associados ao conforto térmico e conforto por qualidade do ar interior. Além disso, serão obtidos também os valores das potências térmicas necessárias, no caso dos sistemas AVAC controlados pelos três algoritmos descritos, com o objetivo de avaliar os consumos de energia envolvidos nas diversas metodologias.

Sistema AVAC desligado

No primeiro cenário, os sistemas AVAC permanecem desligados, de forma que é possível avaliar a resposta passiva dos edifícios. Permite avaliar as condições ambientais que o edifício proporciona aos seus ocupantes apenas pelas suas características construtivas.

Esta simulação é realizada para servir de referência em termos do comportamento térmico ou resposta passiva do edifício. Os valores obtidos podem então ser comparados com os valores obtidos com as diversas soluções posteriormente estudadas.

Sistema AVAC com controlo pelo índice PMV

Como desenvolvido em Fanger (1970), o índice PMV incorpora a influência de diversas variáveis, tais como a temperatura do ar, a temperatura média radiante, a velocidade do ar, a humidade relativa do ar, denominados parâmetros ambientais, e os índices de vestuário e de atividade física do ocupante do edifício, designadas de variáveis individuais. O sistema implementado na simulação neste cenário é controlado pelo índice PMV e o modelo utilizado para tal aplica a atuação do sistema de AVAC com valores de potência diretamente proporcionais ao referido índice. Este modelo foi descrito em 2.6.1.

Sistema AVAC com controlo pelo índice aPMV

O sistema de controlo utilizado neste cenário é aquele que foi desenvolvido pelos autores em (Gomes, 2016). O controlo baseia-se no sistema de controlo adaptativo, num índice de conforto adaptativo que é baseado no índice PMV de Fanger. No entanto, este índice considera a influência da temperatura do ar exterior na perceção de conforto térmico dos ocupantes e utiliza um coeficiente dito adaptativo para ajustar o índice, que foi denominado de aPMV. O procedimento de cálculo é em tudo semelhante ao do algoritmo anterior, exceto no índice utilizado, que é o aPMV. O procedimento está descrito no ponto 2.6.2.

Sistema AVAC com controlo pela temperatura preferida

Neste caso, o controlo do sistema AVAC é feito com base na temperatura preferida dos ocupantes para o interior dos espaços, calculada a partir do modelo empírico explicado no ponto 2.6.3.

Superfícies radiantes alimentadas por bombas de calor geotérmicas

Neste caso, há duas simulações efetuadas com a utilização de sistemas AVAC em que o fluido térmico é obtido pela circulação de água pelo subsolo e é injetado pelas bombas de calor em serpentinas no interior das superfícies do edifício, em sistemas designados por superfícies radiantes, em duas situações diferentes.

Uma delas fornece água a todas as superfícies do compartimento (cenário 5), pavimentos, tetos e paredes, e outra em que se alimentam apenas os pavimentos e os tetos (superfícies horizontais), (cenário 6). É a utilização de uma fonte de energia renovável, embora apresente como desvantagem o facto de ser necessária energia elétrica para as bombas de calor funcionarem. Ainda assim, representa, pela elevada eficiência energética desta solução, uma forma de reduzir os consumos dos edifícios. O caudal de água injetado no tubo em cada superfície de um compartimento foi de $2 \times 10^{-5} \text{m}^3/\text{s}$.

Superfícies radiantes alimentadas por coletores solares térmicos

O procedimento usado nesta simulação é semelhante ao da anterior, mas substituindo as bombas de calor como fonte de energia térmica por sistemas solares térmicos, para alimentar as superfícies radiantes. Este sistema será responsável pela manutenção das condições de conforto térmico nos espaços, somente em período de inverno (estação de aquecimento). É realizada uma única simulação, aplicando os fluidos térmicos às superfícies horizontais (pavimentos e tetos). O caudal de água usado por cada superfície de cada compartimento foi de $2 \times 10^{-5} \text{m}^3/\text{s}$, igual ao caudal usado nas simulações com bombas de calor geotérmicas.

A distribuição dos coletores solares térmicos sobre a totalidade da cobertura do edifício é feita numericamente. Esta metodologia é realizada automaticamente pelo software de simulação dinâmica aplicado.

3.2.4 Bombas de calor geotérmicas e superfícies radiantes

Os sistemas em que foi usada a geotermia foram simulados a partir de um modelo baseado nas trocas de calor de um fluido, neste caso a água proveniente da sua circulação pelo solo, que chega à superfície radiante à temperatura de 18°C.

A água circula pelo tubo, que é instalado em forma de serpentina, como é típico nos sistemas comerciais de pisos radiantes. O tubo escolhido é metálico e apresenta um raio de 0,01 m, ou seja, tem um diâmetro de 20 mm. Para aplicação do modelo foi escolhido ainda um caudal de $2 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ (0,02 litros por segundo ou 72 litros por hora), para cada superfície, adequado ao diâmetro do tubo.

Para poder ser aplicado ao modelo tridimensional do edifício, tornou-se necessário criar uma forma de selecionar as superfícies de forma sistemática, para poder realizar o estudo para a globalidade do edifício.

Optou-se por duas situações:

Aplicar os tubos em todas as superfícies do edifício, o que deu origem ao estudo da geotermia para tetos, chãos e paredes radiantes;

Aplicar os tubos exclusivamente nas superfícies horizontais do edifício, o que deu origem ao estudo da geotermia somente para tetos e pavimentos radiantes;

Como se pode observar na Figura 3.21, em cada superfície há uma entrada de água a 18°C proveniente da bomba de calor geotérmica, num tubo que recebe o número 1. Este tubo prolonga-se até à metade do comprimento necessário de tubo para a referida superfície, marcada com um círculo. A partir deste ponto, estende-se outro tubo, ao qual é atribuída a numeração 2, que encaminha a água para a saída da superfície.

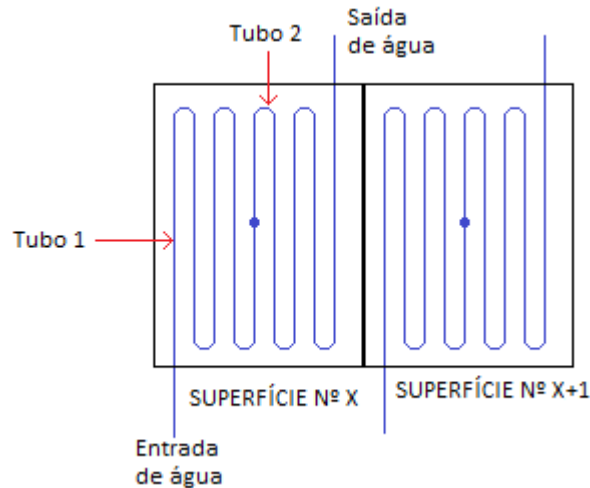


Figura 3.21 - Colocação dos tubos na superfície radiante.

As trocas de calor em regime permanente que se dão entre o fluido circulante e as superfícies radiantes é regida pela seguinte equação:

$$Q = \dot{m} \cdot c_p \cdot (T_i - T_o) \quad (69)$$

Onde:

- \dot{m} é o caudal mássico da água circulante no tubo [kg/s];
- c_p é o calor específico da água a pressão constante [J/(kg·°C)];
- T_i é a temperatura de entrada da água no tubo [°C ou K];
- T_o é a temperatura de saída da água no tubo [°C ou K].

3.2.5 Análise dos consumos de energia

Foram determinados numericamente os valores dos consumos de energia térmica para as três metodologias de controlo dos sistemas AVAC analisadas, o que permitiu uma análise comparativa dos seus desempenhos energéticos. Com o objetivo de validar os resultados destas simulações, com base nos valores de energia térmica consumida foram calculados os valores da energia elétrica consumida pelos sistemas AVAC através de valores de COP e EER estimados para os equipamentos, e posteriormente

comparados com os valores dos consumos de energia elétrica obtidos a partir de medições realizadas nos edifícios do Campus.

3.2.5.1 Consumos determinados por simulação

Um dos parâmetros obtidos da simulação numérica é a potência térmica consumida pelos sistemas AVAC. Na situação em que o sistema está desligado, os resultados para esta potência são, obviamente, sempre nulos, assim como nas situações que envolvem os sistemas baseados em superfícies radiantes. Consequentemente, a análise de consumos é realizada apenas para os três cenários (2, 3 e 4) que utilizam algoritmos de controlo dos sistemas AVAC, pelo índice PMV, pelo índice aPMV e pela temperatura preferida.

Dispondo do valor da potência térmica consumida em cada intervalo de tempo é obtida a energia necessária diariamente em cada compartimento de cada edifício. Nos ficheiros em que a energia é calculada, houve o cuidado de separar os consumos das salas de aula e dos gabinetes. Calcula-se então a energia necessária para cada edifício e para cada metodologia de controlo aplicada. Desta forma é possível analisar, compartimento a compartimento, as necessidades diárias de energia térmica e avaliar cada caso, em função da sua localização no edifício, do número de pessoas expectável que o frequente e da utilização que dele é feita. Também possibilita a comparação com outros compartimentos semelhantes, em diferentes localizações e orientações, e a elaboração de possíveis estratégias para a melhoria da sua eficiência energética.

Os compartimentos escolhidos para análise constituem salas de aulas e gabinetes de docentes e funcionários e a sua seleção foi realizada com o objetivo de obter uma amostragem abrangente, procurando, sempre que possível, salas ou gabinetes com diferentes orientações e volumes e níveis de ocupação diversos. Esta intenção não pôde ser completamente concretizada, devido à inexistência de gabinetes ou salas de aula com diferentes orientações em alguns edifícios, ou mesmo inexistência de salas de aulas, como no caso do edifício dos Serviços de Ação Social.

Em face dos valores anteriormente apresentados na Tabela 2.6 e dos valores indicados pelo REH (2013) no seu artigo 18.º, como referência para o dimensionamento dos sistemas AVAC com bombas de calor, será utilizado como hipótese de cálculo o valor 4 para o coeficiente de desempenho no aquecimento e 3 para o arrefecimento. Deste modo, os consumos de eletricidade dos sistemas AVAC serão calculados a partir dos valores de consumo de energia térmica, de acordo com as seguintes expressões:

- COP (inverno) igual a 4, como indicado na seguinte expressão:

$$E_{elétrica} = \frac{E_{térmica}}{COP} = \frac{E_{térmica}}{4} \quad (70)$$

- EER (verão) igual a 3, calculado a partir da seguinte equação:

$$E_{elétrica} = \frac{E_{térmica}}{EER} = \frac{E_{térmica}}{3} \quad (71)$$

Os consumos calculados pelas simulações com os diferentes sistemas de controlo dos sistemas AVAC serão confrontados com os valores reais para todos os edifícios deste estudo. Esta avaliação também compara os consumos dos diversos edifícios, em condições de verão, de inverno e a soma dos consumos do dia típico de verão e do dia típico de inverno para cada um deles. Será ainda calculado o que se pode chamar de consumo específico, que é obtido dividindo o consumo de energia pela área total do edifício, e comparados os resultados obtidos para os diferentes edifícios.

No último ponto será apresentado um estudo da relação entre os consumos energéticos, a radiação solar incidente nas janelas e as horas de desconforto térmico determinadas para os diferentes edifícios.

3.2.5.2 Sistema integrado de medição dos consumos de energia elétrica

A Universidade do Algarve dispõe desde 2015 de um sistema integrado de medição contínua dos consumos de eletricidade nos seus diversos edifícios. Foi possível obter dados fiáveis sobre estes consumos reais, tornando possível a sua comparação com os consumos elétricos estimados para os sistemas AVAC. Foram efetuadas por medição com analisadores de redes elétricas, que foram colocados nos quadros elétricos gerais

dos diversos edifícios do campus e permitem obter todos os parâmetros elétricos importantes para o fim pretendido. Infelizmente, as medidas envolveram apenas os consumos totais de cada edifício, já que não foram realizadas medições segregadas para os sistemas de AVAC, não permitindo uma comparação direta com os valores simulados. Este modo, tornou-se necessário utilizar uma estimativa da percentagem dos consumos dos equipamentos AVAC em relação ao total de consumos dos edifícios.

Arquitetura do sistema

A arquitetura do sistema de captura e armazenamento de dados de consumo de todos os edifícios do Campus da Penha, da Universidade do Algarve está representada na Figura 3.22.

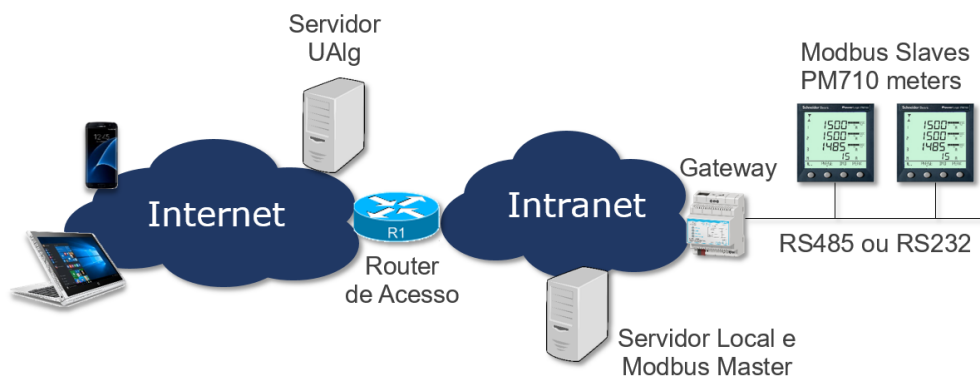


Figura 3.22 - Arquitetura do sistema de captura e armazenamento de dados de consumo dos edifícios do Campus da Penha da Universidade do Algarve.

O Posto de Transformação do Campus da Penha é o local onde estão instalados os equipamentos responsáveis pela realização da medição dos consumos de energia elétrica dos edifícios que compõem o Campus. Trata-se de módulos Power Meter (PM710) da Schneider Electric (Schneider, 2019), instalados no Quadro Geral de Baixa Tensão (QGBT), e a cada edifício está associado um medidor. Os valores obtidos e registados são os da potência ativa instantânea total consumida para cada edifício, e utilizados neste estudo.

Os módulos Power Meter 710 permitiriam também obter também as correntes das 3 fases, do neutro e a média das 3 fases; as tensões fase-fase e fase-neutro para todas as fases, a potência ativa, reativa e aparente, totais e por fase; a Distorção Harmónica Total (THD – *Total Harmonic Distortion*), entre outras variáveis. Estes medidores suportam a comunicação por Modbus/RS485, estando ligados fisicamente a uma *Gateway*, que é um equipamento que permite a adaptação entre o protocolo Modbus/RS485 e o Modbus/TCP/IP (e vice-versa).

Modbus é a designação de um protocolo de comunicação de dados especialmente usado em sistemas de automação industrial e bem adaptado a autómatos programáveis; TCP é o acrónimo inglês para *Transmission Control Protocol*, ou Protocolo de Controle de Transmissão, e IP para *Internet Protocol*, ou Protocolo de Internet, protocolos mais comuns de utilização na Internet; RS485 é um tipo de cabo de comunicações.

Deste modo, através da Gateway é possível ao Servidor Local, que se encontra na rede de dados IP da universidade, solicitar aos medidores, os valores da potência ativa consumida de cada edifício. Os diversos valores medidos por cada módulo PM710 são armazenados em registos Modbus, que são solicitados pelo Servidor Local com uma periodicidade de 60 segundos através de um código Python (tipo de linguagem de programação de alto nível). O *script* Python suporta-se na biblioteca PyModbus para comunicar com os medidores através de Modbus/TCP/IP. Depois de receber os dados, o *script* Python envia-os para um servidor da Universidade do Algarve (Servidor UAlg). Para tal suporta-se numa API Web, o que permite enviar os dados de consumo através de um pedido HTTP GET, em que a URL (página *web*) contém os dados de consumo.

O Servidor UAlg armazena as variáveis recebidas numa base de dados, associando-as a um determinado edifício, permitindo a sua posterior visualização ou descarregamento para análise. O referido servidor está localizado na DMZ (do inglês *demilitarized zone* – zona desmilitarizada), com visibilidade para a Internet, permitindo o seu acesso a partir de qualquer terminal na Internet. DMZ, neste contexto de comunicações na Internet, designa a área de uma rede que se posiciona entre a rede exterior (geralmente a Internet) e a rede interna de uma organização.

Os dados disponíveis que foram utilizados neste estudo referem-se aos anos de 2015, 2016 e 2017, dos quais foram selecionados os valores obtidos referentes aos meses de junho e de dezembro, para se conseguir uma comparação o mais adequada possível com as simulações. Os dados de consumos foram previamente sistematizados para obter valores representativos das situações que analisamos com as simulações, e tratados em 4.4.2. Estas simulações são realizadas considerando um dia típico em que há ocupação efetiva dos espaços interiores dos edifícios, característica de dias úteis.

No cômputo dos valores medidos, houve o cuidado de expurgar os dias dos fins de semana e os períodos de recesso escolar, por exemplo os dias seguintes a 23 de dezembro, cujos consumos se verificou serem semelhantes aos dos fins de semana. Os valores calculados foram então comparados com os valores de consumos previstos pelos cálculos realizados com o software de simulação dinâmica de edifícios. As premissas em que se fundamenta o estudo foram estabelecidas em condições obtidas empiricamente, não correspondendo de forma exata às condições reais, nomeadamente no número de ocupantes dos compartimentos e nos períodos reais de utilização dos mesmos. Esta correspondência exata não seria possível, devido à imprevisibilidade da ocupação dos edifícios. Além disso, algumas das hipóteses colocadas na simulação, como os momentos da abertura das portas, também podem não ter uma correspondência perfeita com a realidade. Por este motivo, são expectáveis algumas diferenças entre os consumos obtidos pelas simulações numéricas e os valores experimentais, resultantes das medições realizadas pelo referido sistema de medição contínua dos consumos da Universidade do Algarve.

3.2.5.3 Determinação dos valores da energia consumida a partir das medições

A partir dos valores obtidos de potências instantâneas ao longo do dia, foram determinadas as potências médias, mínimas e máximas diárias, e ainda a energia diária consumida em cada um dos edifícios objeto deste estudo. Como nem todos os minutos têm valor de leitura disponível, por erros não determinados, o processo de cálculo da

energia diária consumida foi realizado utilizando o valor da potência média diária, de acordo com a seguinte equação:

$$E_{diária} = P_{média} \times 24 \quad [\text{kWh/dia}] \quad (72)$$

Onde:

- $E_{diária}$ é a energia consumida ao longo de um dado dia [kWh/dia];
- $P_{média}$ é a potência média diária [kW];
- O fator 24 refere-se ao número de horas do dia [h].

Para poder realizar a comparação foi calculada a média diária dos valores da energia consumida durante os meses de junho e dezembro, apenas considerando os dias úteis, eliminando os valores correspondentes a dias de fim de semana ou feriados e os períodos de recesso escolar, como os dias após 23 de dezembro. Esta opção foi tomada porque se verificou que os consumos ao fim de semana eram substancialmente mais reduzidos. Caso contrário, poderia ser introduzido um erro apreciável, uma vez que as simulações a realizar envolvem taxas de ocupação previamente definidas, previstas para os dias úteis, com o desenrolar normal dos períodos letivos.

Os dados de consumos não estão desagregados, o que nos impede de conhecer a percentagem do total que corresponde aos consumos dos sistemas AVAC, tornando necessário usar uma estimativa. Foi assumido que o consumo elétrico dos sistemas de ar condicionado representa 50% do consumo total de eletricidade, para os edifícios ESEC, ESGHT e ISE2, 35% para o ISE1, 30% para o SAS e 70% para o CP, para se poder utilizar os valores resultantes das simulações nas comparações com os valores medidos.

Estes valores basearam-se em valores obtidos em auditorias realizadas anteriormente a alguns dos edifícios, e ao tipo de utilização e número de compartimentos.

3.2.6 Produção de eletricidade com sistemas fotovoltaicos

O último tópico a ser desenvolvido é o da instalação de sistemas solares fotovoltaicos nas coberturas dos edifícios, realizado nos modelos construídos em programa de desenho assistido por computador. O programa de simulação numérica determina os valores das áreas disponíveis para o efeito, a sua localização, e calcula a energia produtível da instalação fotovoltaica, para o dia típico de verão, e para o dia típico de inverno, pelo módulo introduzido no programa pelos autores.

O estudo do projeto de sistemas de energia solar, tanto no caso de aproveitamentos fotovoltaicos como no de sistemas térmicos, envolve sempre a seleção rigorosa dos locais onde deverá ser realizada a instalação, procurando zonas livres de sombras, sempre que possível, e uma avaliação das áreas disponíveis para o efeito. Além disso, é muito importante, para a maximização da energia produtível, dispor os painéis com a inclinação e a orientação ótimas, de modo a maximizar a produção energética e rentabilizar os investimentos realizados na sua implementação.

As especificidades do estudo das soluções de instalações solares, no caso das coberturas de edifícios já construídos, além das acima citadas, são a necessidade da determinação das distâncias adequadas entre os conjuntos de painéis, tendo como fito evitar o sombreamento dos mesmos ao longo dos dias, devido ao movimento aparente do sol no horizonte.

A situação mais desfavorável, que ocorre no mês de dezembro devida ao solstício de inverno, quando o sol descreve trajetórias com as mais baixas elevações durante o dia, é usada para calcular a distância recomendada entre os grupos de módulos. O objetivo é dispor o maior número possível de painéis e maximizar a energia produtível anual, mas evitar que os grupos de módulos afetem a captação de radiação solar pelos grupos das linhas seguintes.

Ao ser realizada a consulta para o campus da Penha no PVGIS (2012), foram obtidas as coordenadas do local, nomeadamente, a latitude de 37,0 °N e a longitude de 7,9 °O. Em seguida, foi determinada a inclinação ótima para maximizar a produção anual, cujo resultado foi de 33°, e a orientação ótima, de 0°, ou seja, os módulos devem estar virados para o sul geográfico.

Por outro lado, também se pode calcular a inclinação ótima anual pelo método apresentado no ponto 2.10.2.6, através da equação (54). Como a latitude é de 37° , tem-se:

$$\beta_{opt} = 3,7 + 0,69 \cdot |37| = 29,23^\circ \quad (73)$$

Como os resultados obtidos são algo diferentes, a opção tomada foi por uma inclinação de 30° . O azimute escolhido foi de 0° .

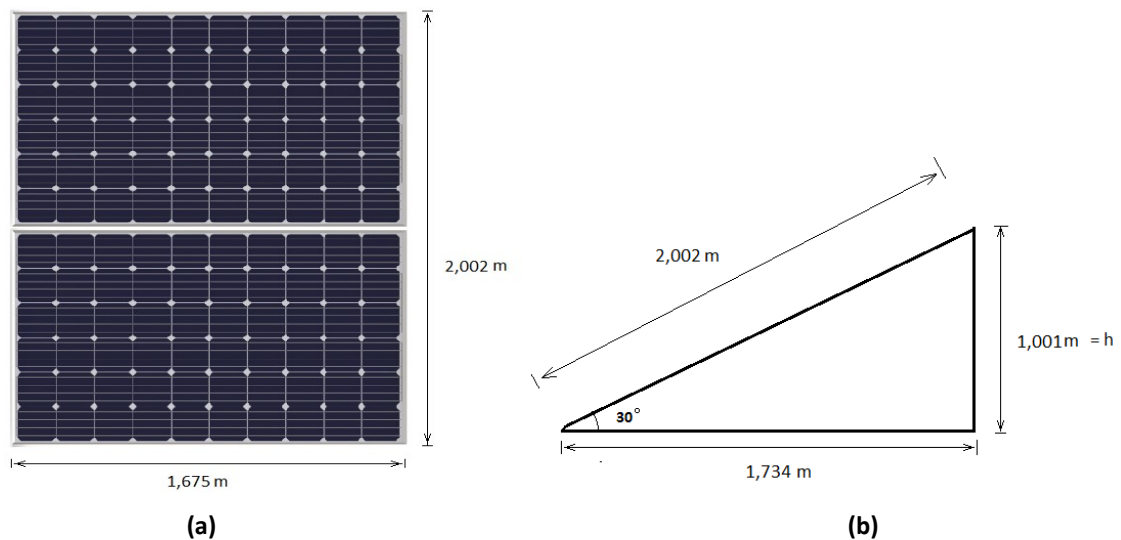


Figura 3.23: (a) Posicionamento relativo dos módulos; (b) Perfil da colocação.

A colocação dos módulos foi feita da maneira indicada na Figura 3.23, o que resulta numa altura h de 1,001 m.

O cálculo pelo primeiro método descrito em 2.9.5 resulta em $d = 3,504$ m, o segundo procedimento resulta em $d = 3,769$ m. Para o método descrito em IDAE (2011) resulta em $k = 2,246$, e $d = 2,248$ m.

Note-se que, neste método, d corresponde à distância entre a projeção vertical ao solo da extremidade mais elevada do módulo e a base de apoio do próximo módulo, pelo que é necessário somar a distância de 1,734 m, resultando numa distância mínima de 3,982 m. Atendendo aos diferentes valores encontrados, optou-se por uma distância de 4,00 m entre as bases dos módulos, como se pode observar na Figura 3.24.

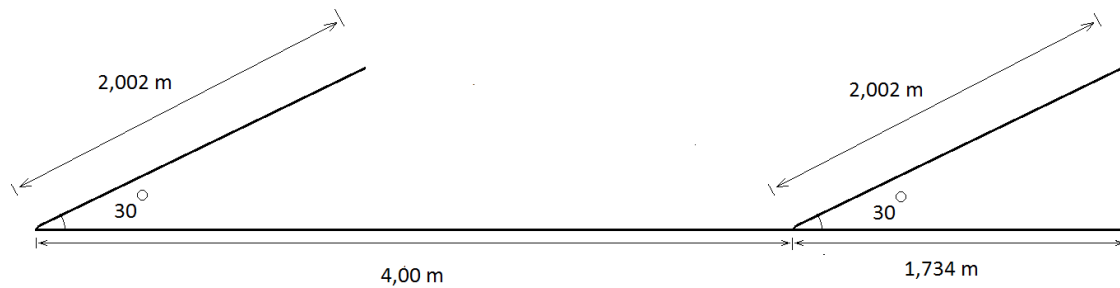


Figura 3.24: Distância entre os grupos de painéis fotovoltaicos escolhida para a instalação.

A Figura 3.25 apresenta o edifício da Edifício da Escola Superior de Educação e Comunicação com a colocação dos campos fotovoltaicos, devidamente dispostos nas suas coberturas.

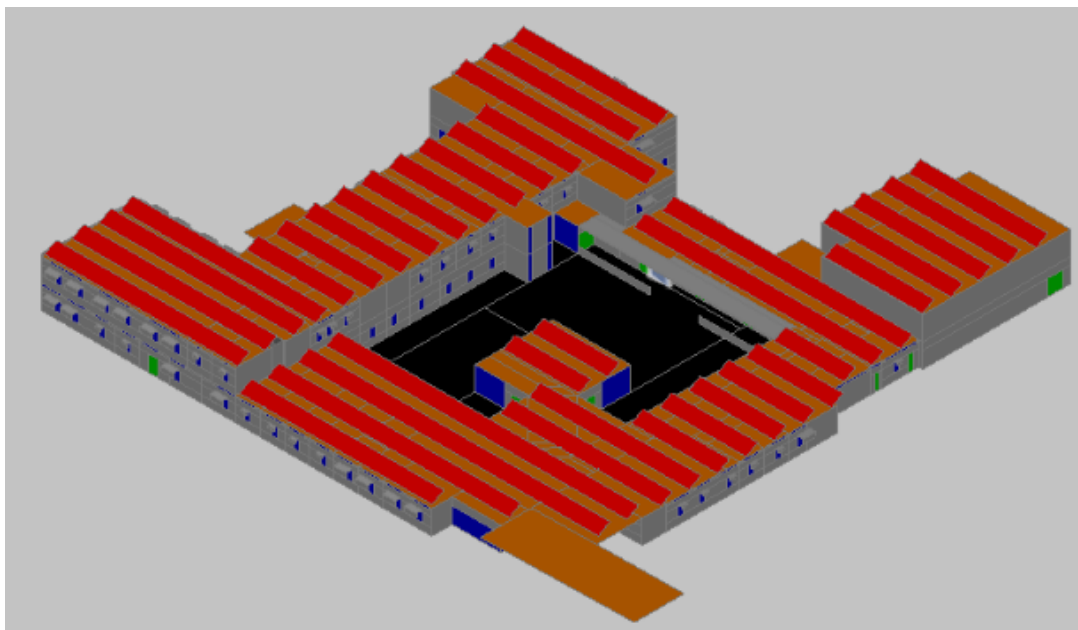


Figura 3.25 - Módulos fotovoltaicos na cobertura do edifício ESEC.

Idêntico modelo é apresentado na Figura 3.26 para o edifício Escola Superior de Gestão, Hotelaria e Turismo.

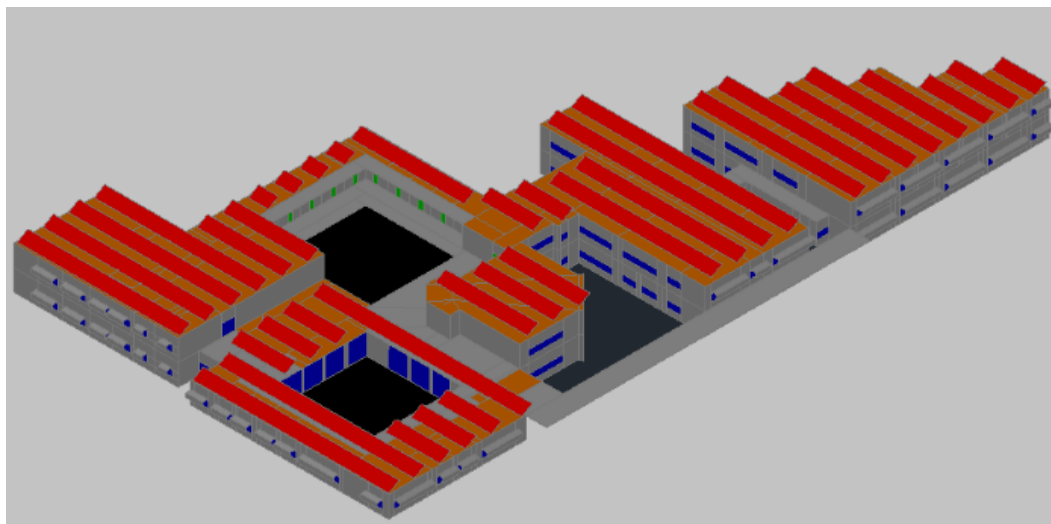


Figura 3.26: Módulos fotovoltaicos na cobertura do edifício ESGHT.

A Figura 3.27 mostra a disposição dos painéis fotovoltaicos para o edifício nº 1 do Instituto Superior de Engenharia (ISE1).

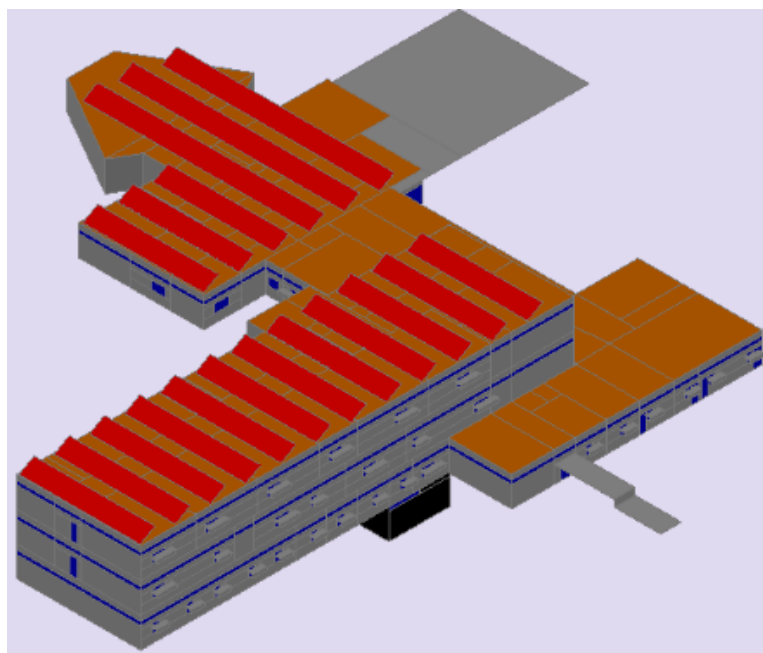


Figura 3.27: Módulos fotovoltaicos na cobertura do edifício n.1 do ISE.

Na Figura 3.28 pode ser observada a disposição dos módulos criada para o edifício nº 2 do Instituto Superior de Engenharia.

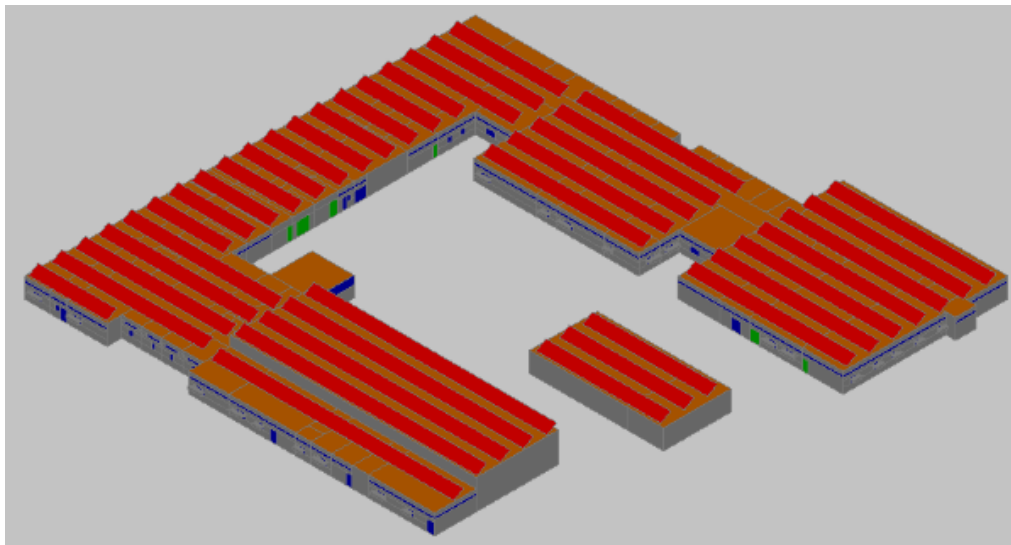


Figura 3.28: Módulos fotovoltaicos na cobertura do edifício n.º2 do ISE.

Na Figura 3.29 pode ser vista a colocação dos módulos nas coberturas do Complexo Pedagógico.

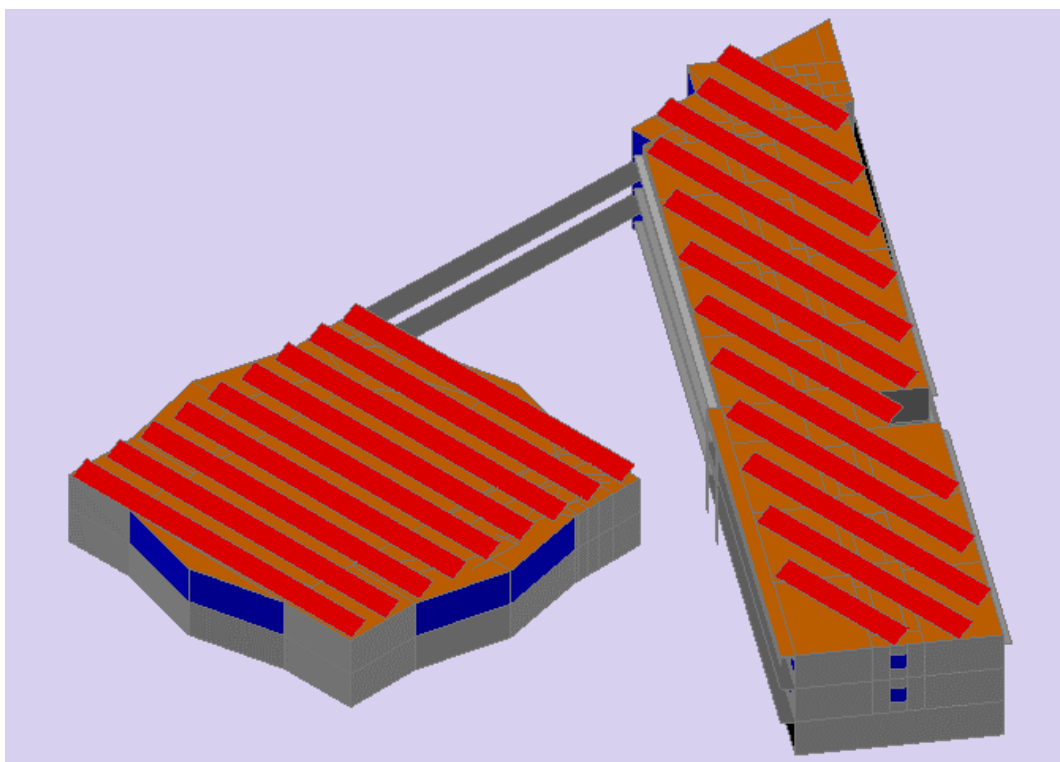


Figura 3.29: Módulos fotovoltaicos na cobertura do CP.

A distribuição dos painéis fotovoltaicos pela cobertura do edifício dos Serviços de Ação Social está representada na Figura 3.30.

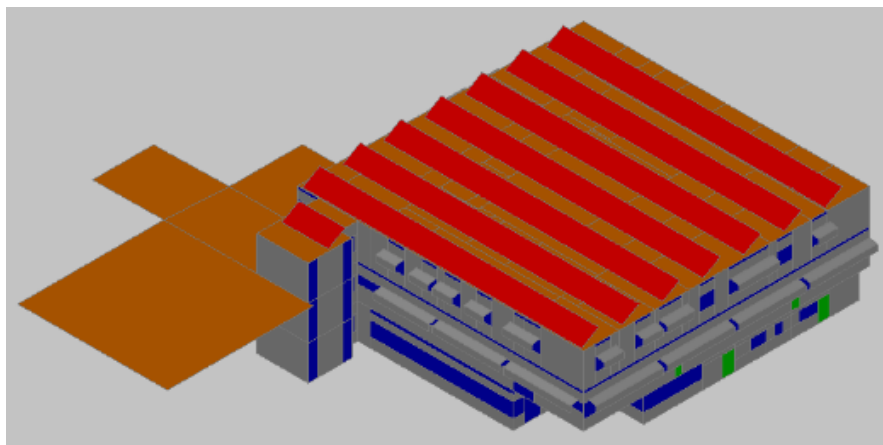


Figura 3.30: Módulos fotovoltaicos na cobertura do edifício SAS.

Os parâmetros do módulo selecionado para ser introduzido no modelo foram recolhidos a partir do manual do fabricante (Sunworld), e são apresentados na Tabela 3.5. Os valores referem-se a um módulo de silício policristalino cuja potência máxima é de 260 Wp, em Condições Standard de Teste. Outros valores importantes para o dimensionamento são as dimensões do painel, de 1675x1001 mm, o que resulta numa área de aproximadamente 1,68 m².

Tabela 3.5: Dados técnicos do módulo fotovoltaico.

a) Dados do painel sob condições padrão de teste (STC)

Potência máxima	P_{max}	260 Wp
Tensão de circuito aberto	V_{oc}	37,9 V
Tensão à máxima potência	V_{mp}	31,6 V
Corrente de curto-circuito	I_{sc}	8,73 A
Corrente à máxima potência	I_{mp}	8,24 A

b) Dados do painel sob condições NOCT

Potência máxima	P_{max}	187,6 Wp
Tensão de circuito aberto	V_{oc}	34,1 V
Tensão à máxima potência	V_{mp}	28,5 V
Corrente de curto-circuito	I_{sc}	7,05 A
Corrente à máxima potência	I_{mp}	6,59 A

c) Características térmicas do módulo

NOCT	48 °C
Coeficiente de temperatura para I_{sc}	0,004%/°C
Coeficiente de temperatura para V_{oc}	-0,30%/°C
Coeficiente de temperatura para P_{max}	-0,45%/°C
Temperatura de operação	-40 °C a 85 °C

d) Outras características

Número de células por módulo	60
Tipo de célula	Policristalino
Dimensões do módulo	1675 mm x 1001 mm
Dimensões da célula	156 mm x 156 mm
Peso	21,2 kg

4 Análise e discussão de resultados

Este capítulo é dividido em seis subcapítulos, onde são apresentados os resultados obtidos de acordo com as metodologias explanadas no capítulo 3, para todos os edifícios considerados neste estudo. Os subcapítulos analisam os seguintes pontos:

1. Avaliação da radiação solar total incidente nas janelas;
2. A evolução das condições de conforto térmico e de qualidade do ar interior proporcionadas pelos edifícios aos seus ocupantes, onde são tratados os resultados de sete simulações diferentes realizadas aos sistemas AVAC;
3. Os somatórios das horas de desconforto térmico e das horas de desconforto devido à qualidade do ar interior, para todos os sistemas acima descritos;
4. Os consumos (obtidos numericamente) de energia térmica e elétrica dos três sistemas de controlo aplicados aos equipamentos AVAC (PMV, aPMV e temperatura preferida) e a sua comparação com os consumos elétricos reais dos edifícios, totais e dos sistemas AVAC;
5. O estudo da relação entre a radiação solar incidente nas janelas, os consumos energéticos e as horas de desconforto térmico;
6. A produção de energia elétrica a partir de sistemas fotovoltaicos, instalados nas coberturas dos edifícios, e a sua comparação com os consumos elétricos dos sistemas AVAC e com os consumos totais dos edifícios, onde são apresentados os valores das áreas de módulos para cada edifício e os valores da energia produtível, atendendo às condições de verão e às condições de inverno.

4.1 Radiação solar incidente nas janelas

Neste ponto são apresentados os resultados referentes aos valores de radiação solar incidente nas janelas dos edifícios estudados.

Os valores da radiação solar diária total incidente nas janelas, para as condições de verão e de inverno, em cada edifício, são mostrados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Radiação solar diária incidente nas janelas [Wh].

Edifício	Verão	Inverno
ESEC	88 173	87 628
ESGHT	178 239	120 237
ISE 1	119 808	75 163
ISE 2	84 302	90 906
CP	293 308	281 587
SAS	71 927	56 726
Total	747 584	624 619

Os valores totais da energia solar recebida pelas janelas dos compartimentos dos edifícios ESEC, ISE 2 e CP ao longo do dia são próximos, em condições de verão, dos obtidos em condições de inverno. Os restantes (ESGHT, ISE 1 e SAS) apresentam valores bem superiores no verão.

Na Figura 4.1 pode-se observar a evolução da radiação solar incidente nas janelas em cada um dos edifícios analisados, em condições de verão.

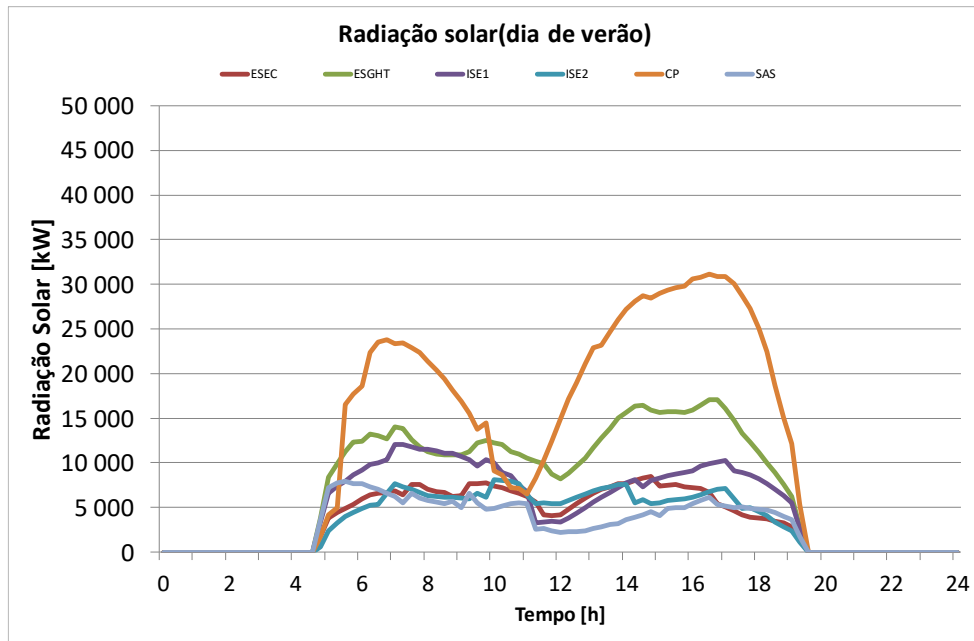


Figura 4.1 – Evolução da radiação solar incidente nas janelas, para todos os edifícios analisados, em condições de verão.

Em condições de verão, todos os edifícios apresentam uma redução nos valores da radiação solar incidente nas janelas no período em torno do meio-dia, revelando o efeito dos dispositivos de sombreamento, de uma forma mais acentuada no CP do que nos restantes edifícios.

Em condições de inverno, a evolução da radiação solar está apresentada na Figura 4.2.

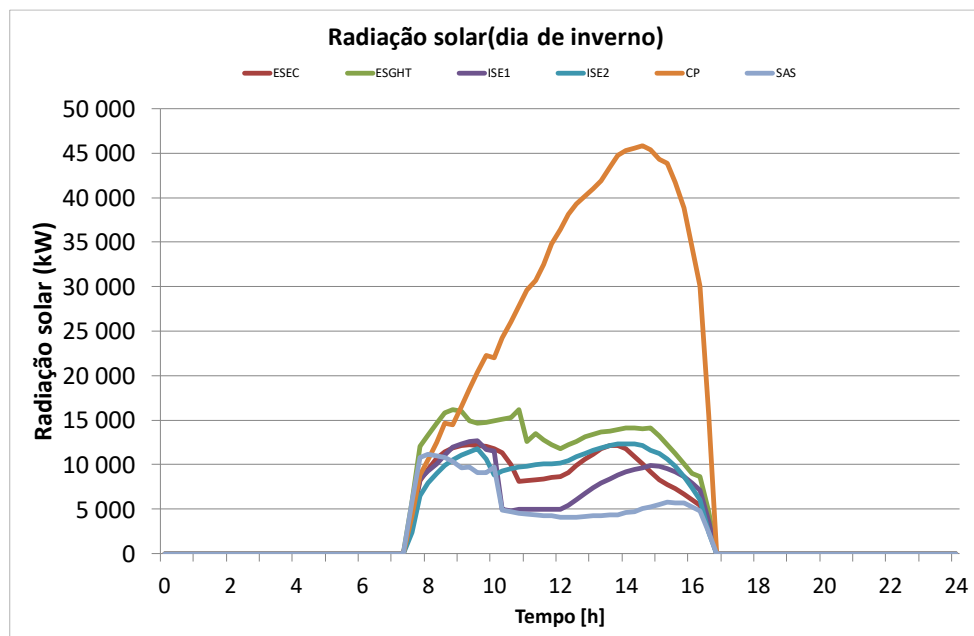


Figura 4.2 - Evolução da radiação solar incidente nas janelas, para todos os edifícios analisados, em condições de inverno.

Nota-se que a radiação solar incidente nas janelas dos edifícios é maior em condições de inverno do que em condições de verão, o que ocorre devido à presença de muitos elementos de sombreamento na arquitetura dos edifícios; ainda assim, ocorre alguma diminuição do nível da referida componente da radiação solar para todos os edifícios em torno do meio-dia, exceto para o CP. Este último edifício recebe o maior nível de radiação solar incidente nas janelas em quase todos os períodos do dia, o que pode ser explicado pela grande superfície vidrada e pelas próprias dimensões dos edifícios que o compõem.

4.2 Conforto térmico e qualidade do ar interior

Os resultados obtidos nas simulações para as variáveis associadas ao conforto térmico e à qualidade do ar interior serão apresentados por edifício, na ordem em que os ditos edifícios foram apresentados neste trabalho, e para as diferentes simulações, tal como foi descrito no ponto 3.2.3.

Foram realizadas 11 simulações, e serão identificadas nos gráficos da seguinte forma:

- AVAC (0) – sistema AVAC desligado (verão e inverno);
- PMV – sistema AVAC com controlo pelo índice PMV (verão e inverno);
- aPMV – sistema AVAC com controlo pelo índice aPMV (verão e inverno);
- TP – sistema AVAC com controlo pela temperatura preferida dos ocupantes (verão e inverno);
- GEO (T) – sistema com todas as superfícies radiantes (tetos, pavimentos e paredes) alimentadas por bombas de calor geotérmicas (só em condições de verão);
- GEO (H) – sistema com superfícies horizontais radiantes (só tetos e pavimentos) alimentadas por bombas de calor geotérmicas (só em condições de verão);
- ST - sistema com superfícies horizontais radiantes (só tetos e pavimentos) alimentadas por coletores solares térmicos (só em condições de inverno);

São apresentados e analisados três gráficos por edifício: um deles com a evolução diária da concentração de dióxido de carbono, para análise da qualidade do ar interior; os restantes dois gráficos apresentam a evolução do índice de conforto térmico PMV no interior dos compartimentos, em condições de verão e de inverno. Nos gráficos correspondentes às condições de verão apresentam-se seis sistemas, enquanto de inverno são apenas cinco.

O programa de simulação de edifícios calcula todos os parâmetros referidos, para todos os compartimentos, e foram também produzidos e analisados outros gráficos, nomeadamente para a temperatura média radiante e temperatura do ar interior, e para o índice PPD, em condições de verão e de inverno, em diversos compartimentos de todos os edifícios, que não serão apresentados neste documento. São analisados seis compartimentos neste trabalho, um por edifício: 3 salas de aulas comuns, dois laboratórios e uma secretaria. Escolheram-se preferencialmente salas de aulas, comuns ou laboratórios, tentando apresentar várias orientações, para uma análise abrangente, embora isso nem sempre tenha sido possível, já que nos diversos edifícios não existem as mesmas tipologias nas diversas orientações. Além disso, no edifício SAS não existem salas de aulas, pelo que foi necessário optar por uma secretaria.

4.2.1 Edifício da Escola Superior de Educação e Comunicação (ESEC)

Para este edifício é analisado um laboratório, que corresponde ao compartimento 73, orientado a este.

Qualidade do ar interior

Na Figura 4.3 pode ser observada a evolução da concentração do CO₂ no compartimento 73 (E) deste edifício. Pode-se verificar que a concentração de CO₂ aumenta nos períodos em que as salas de aula estão ocupadas, diminuindo quando ocorrem os intervalos das aulas, mas nunca ultrapassa, para nenhum dos compartimentos analisados, o valor de 1400 mg/m³, ficando bem abaixo do limite máximo estipulado pelo RECS (2013) de 2250

mg/m³. O valor da concentração de dióxido de carbono do ar exterior utilizado nas simulações é de 500 mg/m³, baseado em medições realizadas no Campus da Penha.

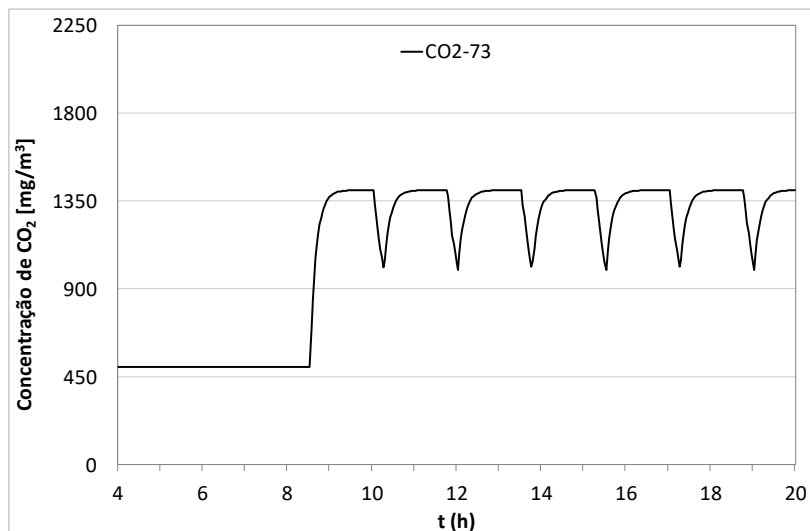


Figura 4.3 - Evolução da concentração de CO₂ para a sala 73 (E), do edifício ESEC.

Conforto térmico

- Condições de Verão

Os resultados obtidos para a evolução do índice PMV na sala 73 (E), para os sistemas AVAC estudados, para o dia típico de verão, estão indicados na Figura 4.4.

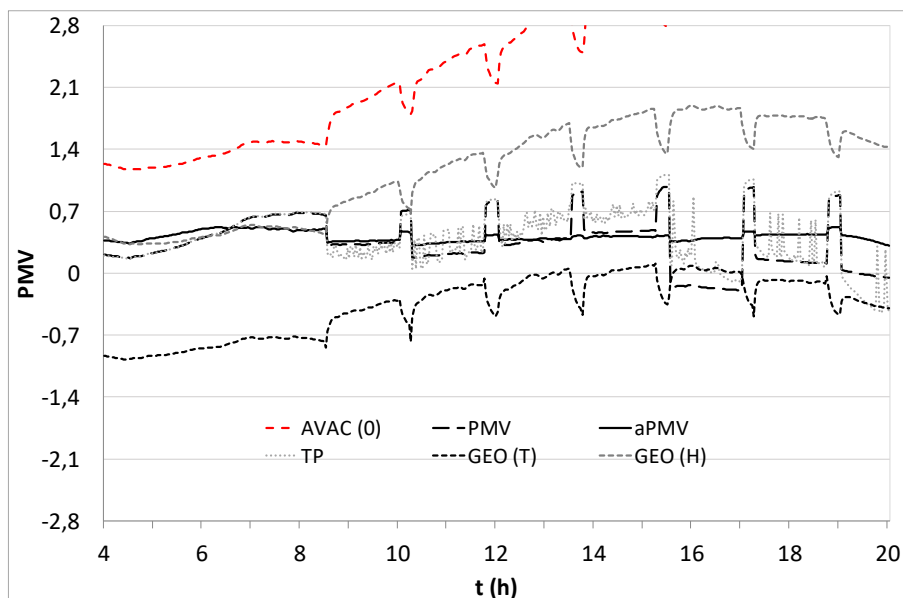


Figura 4.4: Evolução do índice PMV em condições de verão na sala 73 do edifício ESEC, para os sistemas AVAC analisados.

Com o sistema AVAC desligado, o índice PMV apresenta valores consistentemente acima de +0,7, nos horários com ocupação dos compartimentos, revelando condições de conforto térmico inaceitáveis, de forma progressivamente mais acentuada durante a tarde. Observa-se que a presença dos ocupantes tende a aumentar o valor do índice PMV, como esperado.

Com o controlo do índice PMV as pessoas sentem-se termicamente confortáveis na sala 73, de verão, praticamente durante todo o dia. O índice PPD foi analisado e de uma forma geral apresenta valores inferiores a 15% de pessoas insatisfeitas por desconforto térmico.

Com o sistema controlado com o índice aPMV observa-se que este índice se mantém sempre na zona de conforto (-0,7 a +0,7) definida pela categoria C estipulada pela ISO 7730 (2005) e o índice PPD nunca ultrapassa 15%, chegando, em alguns momentos, a permanecer dentro dos limites da categoria B (10% de pessoas insatisfeitas). Mesmo para salas com diferentes orientações este sistema de controlo é eficaz a manter o conforto térmico dos ocupantes.

Com o controlo TP (temperatura preferida) o índice PMV permanece dentro do intervalo definido pela categoria C da ISO 7730 (2005) na parte da manhã, ocorrem valores um pouco acima de +0,7 à tarde, o que configura desconforto térmico muito ligeiro por calor.

Para os três sistemas de controlo, a TMR é sempre próxima da temperatura do ar, não afetando as condições de conforto térmico.

Com o sistema GEO(T), de todas as superfícies radiantes alimentadas por bombas de calor geotérmicas, a evolução do índice PMV ocorre dentro dos limites definidos pela categoria C. De notar que a presença dos ocupantes contribui para a subida do índice PMV. O índice PPD mantém-se abaixo de 15%, ficando muito próximo de 6% (limite da categoria A) nos períodos de ocupação dos compartimentos.

Com o sistema GEO(H), de superfícies horizontais radiantes alimentadas por bombas de calor geotérmicas, o conforto térmico da sala nunca é aceitável, e vai-se tornando

progressivamente mais desconfortável ao longo do dia, porque o índice PMV ultrapassa o limite máximo da categoria C (ISO 7730, 2005).

A temperatura média radiante apresenta valores idênticos à temperatura do ar para os dois sistemas de bombas de calor geotérmicas, não alterando as condições de conforto térmico.

- *Condições de Inverno*

Para o dia típico de inverno, a Figura 4.5 mostra a evolução do índice PMV para os sistemas AVAC estudados, aplicados à sala 73.

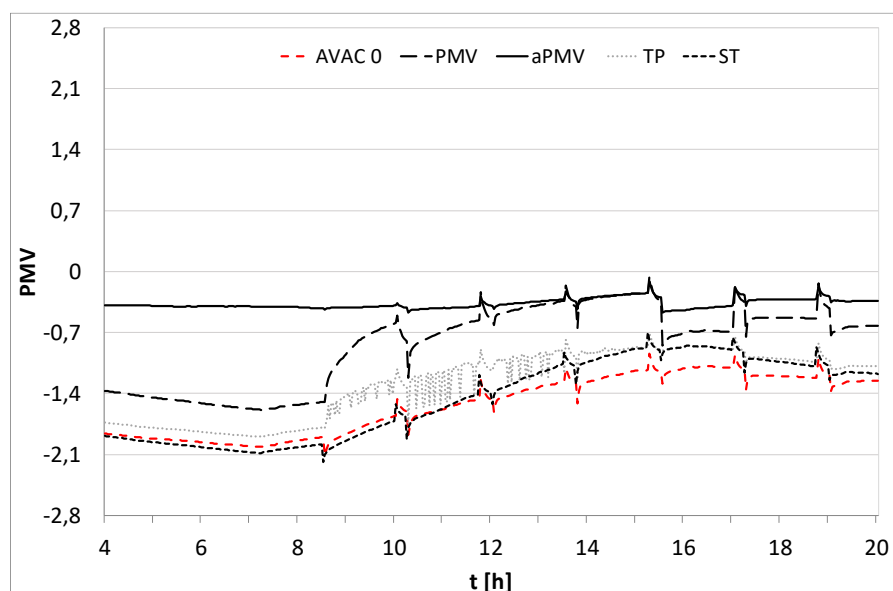


Figura 4.5: Evolução do índice PMV, de verão, na sala 73 do edifício ESEC, para os sistemas AVAC analisados.

A resposta passiva (com o sistema AVAC desligado) em condições de inverno da sala 73 mantém as pessoas termicamente desconfortáveis, por valores negativos do índice PMV, e a presença dos ocupantes contribui para um aumento progressivo deste índice, mas nunca se aproxima do limite inferior da categoria C da norma ISO 7730 (2005).

O sistema de controlo PMV não consegue garantir as condições de conforto térmico exigidas, de inverno, no primeiro período de ocupação da manhã, apresentando valores

do índice PMV abaixo de $-0,7$, mas a partir das 10:30 e durante a tarde, no entanto, está garantido o conforto térmico dos ocupantes.

O controlo aPMV mantém as condições de conforto térmico para os ocupantes durante todo o dia típico de inverno, por valores negativos do índice PMV, mas superiores ao limite inferior do intervalo definido na categoria C.

Com controlo pela temperatura preferida, o sistema AVAC não consegue proporcionar conforto térmico aceitável aos ocupantes durante todo o dia, já que os valores do índice PMV estão abaixo do limite mínimo de conforto ($-0,7$).

Com as superfícies radiantes horizontais alimentadas por coletores solares térmicos (ST), verifica-se que os valores do índice PMV na sala 73 permanecem abaixo de $-0,7$, durante quase todo o dia.

A temperatura média radiante apresenta valores sempre inferiores aos da temperatura do ar, de facto piorando as condições de conforto térmico dos ocupantes, já que se trata de condições de inverno.

4.2.2 Edifício da Escola Superior de Gestão, Hotelaria e Turismo (ESGHT)

Nesta secção são apresentados os resultados da avaliação das condições de conforto térmico e da QAI do edifício da ESGHT. O compartimento analisado é a sala de aulas 10, virada a oeste. Este edifício foi alvo de um estudo mais aprofundado apresentado em Conceição *et al* (2019).

Qualidade do ar interior

A evolução da concentração do CO_2 na sala 10 está representada na Figura 4.6, onde se pode observar que a qualidade do ar interior está assegurada, já que a o valor da referida concentração se mantém dentro dos limites regulamentares, numa banda de valores entre 500 e 1400 mg/m^3 , bastante abaixo do valor limite permitido pelo RECS (2013) de 2250 mg/m^3 .

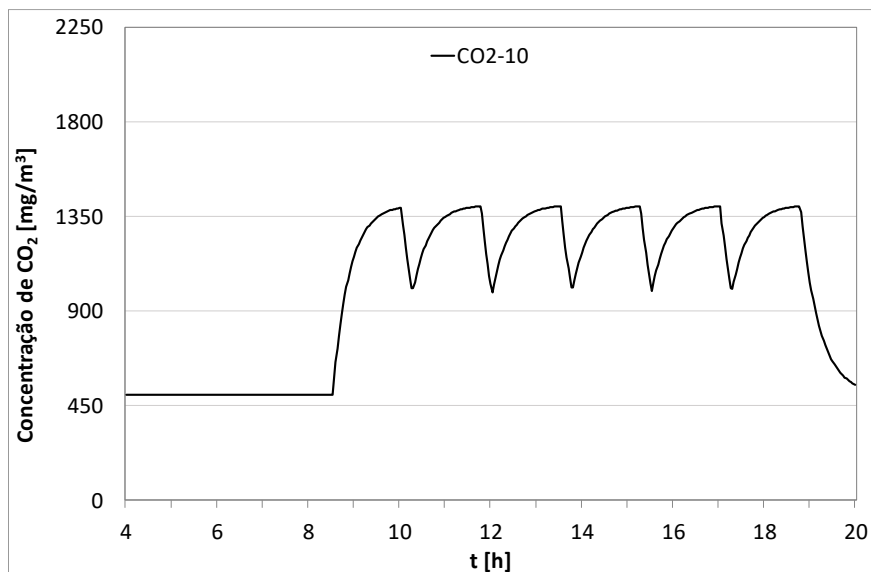


Figura 4.6: Evolução da concentração de CO₂ para a sala 10 do edifício ESGHT.

Conforto térmico

- Condições de Verão

A evolução do índice PMV na sala 10 para os diversos sistemas AVAC estudados, em condições de verão, são apresentados na Figura 4.7.

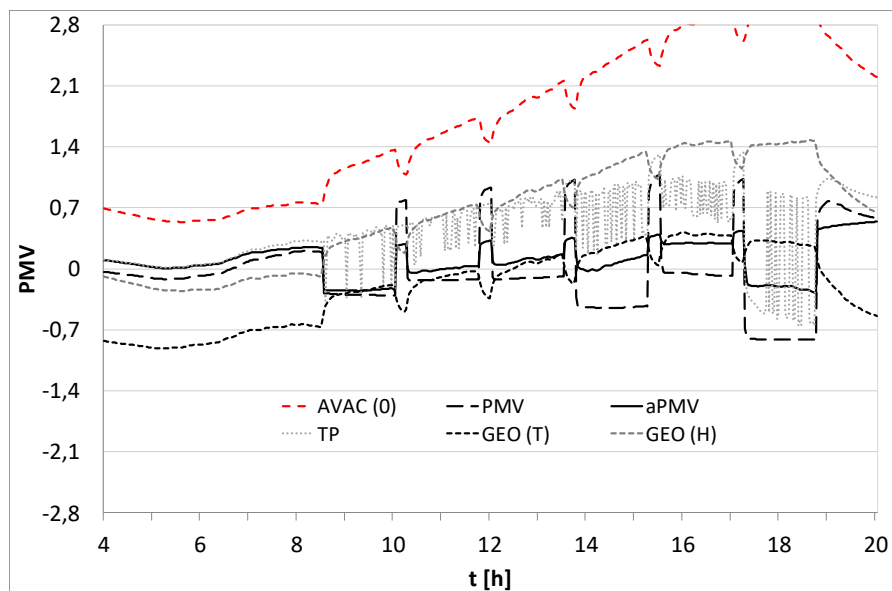


Figura 4.7: Evolução do índice PMV em condições de verão na sala 10 do edifício ESGHT, para os sistemas AVAC analisados.

Verifica-se que, sem ligar o sistema AVAC, em condições de verão, o índice PMV ultrapassa +0,7 e continua a aumentar de forma quase constante ao longo do dia, criando condições de desconforto térmico crescente por calor. Para algumas salas, o índice PPD correspondente atinge valores de cerca de 80%.

Quando o sistema AVAC é controlado pelo índice PMV pode-se verificar que as condições de conforto térmico são mantidas, no verão, porque o este índice varia entre +0,7 e -0,7, nos diversos períodos em que há ocupação do compartimento analisado. Só no período entre as 17:00 e as 18:30 o índice PMV desce ligeiramente abaixo do limite mínimo imposto pela categoria C da norma ISO 7730 (2005).

Com o controlo do índice aPMV, este índice quase sempre apresenta valores muito próximos de zero, dentro do intervalo definido pela categoria B (ISO 7730, 2005), revelando-se confortável para mais de 90% dos ocupantes (PPD<10%).

O método do controlo temperatura preferida, no dia típico de verão, só consegue manter o índice PMV abaixo de +0,7 até perto do meio-dia, passando a ocorrer condições de desconforto térmico moderado por calor durante o resto da tarde, situação confirmada pela evolução do índice PPD, que supera os 15% neste período.

A TMR apresenta valores próximos da temperatura do ar para os três sistemas, não influenciando as condições de conforto.

Com base nos resultados obtidos para o sistema aqui designado GEO (T) pode-se afirmar que a sua utilização garante condições aceitáveis de conforto térmico durante todo o dia.

O sistema radiante GEO (T), de todas as superfícies radiantes, consegue manter condições de conforto térmico aceitáveis durante todo o dia.

Com o sistema GEO(H), só com tetos e pavimentos radiantes, o índice PMV varia dentro dos limites da categoria C para a sala 10(O), durante a manhã, mas sobe progressivamente ao longo do dia, causando desconforto térmico por calor para os ocupantes.

A TMR nos dois sistemas de superfícies radiantes é quase sempre inferior à temperatura do ar, o que influencia positivamente as condições de conforto térmico dos ocupantes.

- Condições de Inverno

A Figura 4.8 mostra a evolução do índice PMV para a sala 10, com os sistemas AVAC analisados.

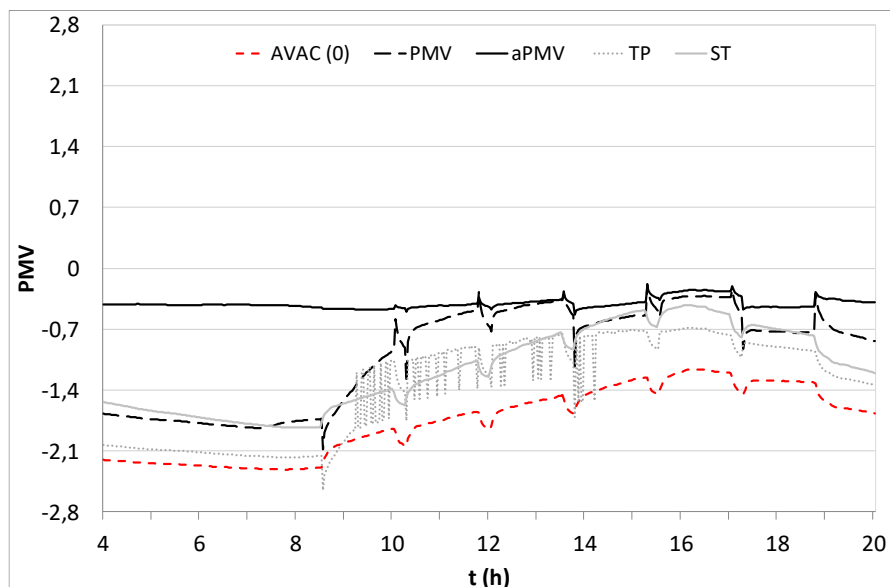


Figura 4.8: Evolução do índice PMV, de inverno, na sala 10 do edifício ESGHT, para os sistemas AVAC analisados.

Em condições de inverno, com o sistema AVAC desligado, os ocupantes estão sempre termicamente desconfortáveis por valores negativos do índice PMV. A presença dos ocupantes contribui para reduzir a sensação de desconforto térmico.

O índice de conforto térmico PMV apresenta valores inferiores a -0,7, com o controlo do índice PMV, das 8:30 às 10:00 horas, denotando desconforto térmico por frio, mas nos restantes períodos os valores mantêm-se dentro dos limites aceitáveis de acordo com a categoria C da ISO 7730 (2005).

O sistema AVAC controlado com o índice aPMV consegue proporcionar boas condições de conforto térmico às pessoas, com valores entre 0 (zero) e o limite inferior aceitável (-0,7).

Com o sistema AVAC controlado pelo método da temperatura preferida, TP, no dia típico de verão, as condições da sala 10 só entram na zona de conforto térmico das 14 às 18 horas, com desconforto térmico moderado por frio durante a manhã e no final da tarde.

Não consegue, portanto, garantir de forma totalmente eficaz a manutenção de condições de conforto térmico durante todo o dia.

A temperatura do ar apresenta valores ligeiramente superiores aos da TMR para os três sistemas de controlo, o que é positivo para o conforto térmico.

Os resultados obtidos para o sistema ST, com superfícies radiantes horizontais alimentadas por coletores solares térmicos, são muito parecidos com os do controlo pela temperatura preferida. Durante a manhã há uma percentagem de pessoas termicamente insatisfeitas, mas durante a tarde, em especial a partir das 15:00 horas, as condições de conforto térmico são aceitáveis.

4.2.3 Edifício nº 1 do Instituto Superior de Engenharia (ISE 1)

Neste edifício são avaliadas as condições de conforto térmico e da QAI na sala de aulas 79, com orientação da área envidraçada a este.

Qualidade do ar interior

A Figura 4.9 mostra a evolução diária da concentração de CO₂ na sala 79.

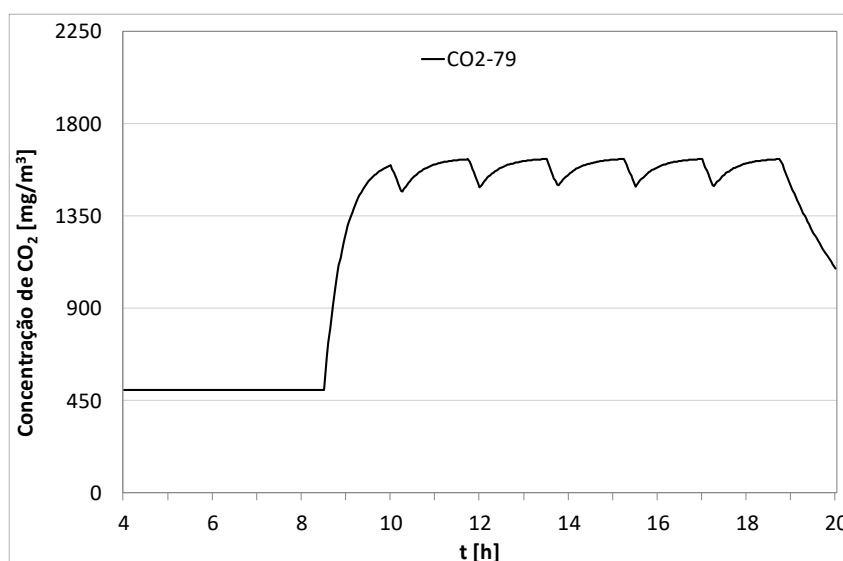


Figura 4.9 - Evolução da concentração de CO₂ para a sala 79 do edifício n.º1 do ISE.

A ventilação predefinida revela-se adequada para manter a qualidade do ar interior para este edifício, já que a concentração de dióxido de carbono nunca ultrapassa 1630 mg/m³, bem abaixo do limite regulamentar de 2250 mg/m³.

Conforto térmico

- Condições de verão

Na Figura 4.10 pode ser observada a evolução do índice PMV para os sistemas AVAC na sala 26 (S) do edifício nº1 do IS.

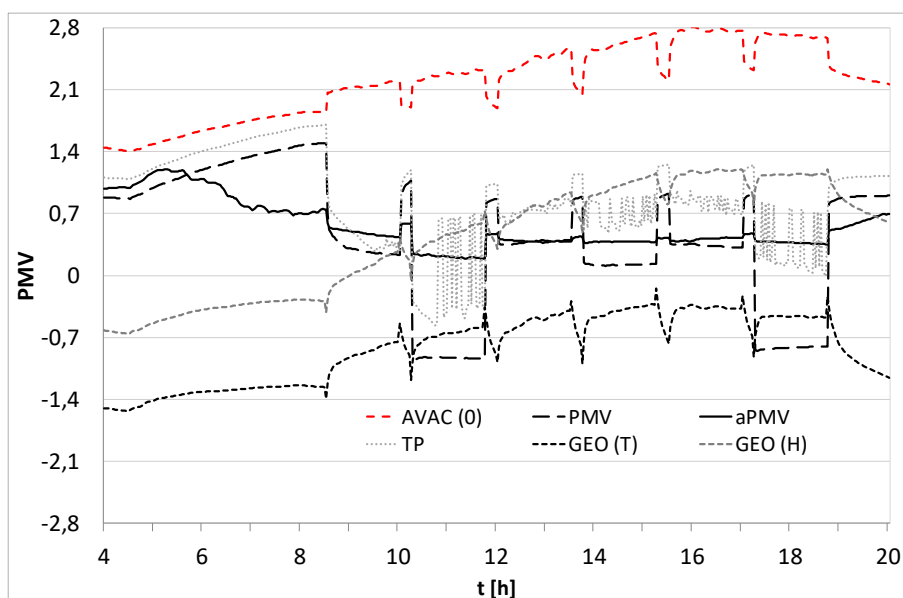


Figura 4.10: Evolução do índice PMV, de verão, na sala 79 do edifício nº1 do ISE, para os sistemas AVAC analisados.

Com o sistema de AVAC desligado, este edifício nunca proporciona condições de conforto térmico aos seus ocupantes na sala 79, em condições de verão, sempre com valores acima de +0,7 para o índice PMV. Outras salas viradas a sul também se apresentam como as mais quentes, o que seria à partida expectável.

O sistema AVAC pelo índice PMV consegue proporcionar valores deste índice dentro do intervalo definido pela norma ISO 7730 (2005). Só ocorre desconforto térmico moderado por frio durante o primeiro período de ocupação da parte da manhã, e o período no final da tarde apenas desconforto ligeiro. Não há diferenças muito

significativas entre as várias salas. O índice PPD apresenta valores acima dos 15% apenas durante a manhã, entre as 10:00 e as 12:00 horas.

Observa-se que este sistema de controlo do índice aPMV proporciona boas condições de conforto térmico aos utilizadores dos espaços interiores do edifício nº1 do ISE, no verão. Todas as restantes salas avaliadas proporcionam condições de conforto térmico aceitáveis.

O controlo pela temperatura preferida apenas mantém condições aceitáveis de conforto térmico até cerca das 11:30 horas, com valores próximos do limite máximo de +0,7 definido na categoria C da norma ISO aplicável, mas não consegue evitar que as pessoas se sintam moderadamente desconfortáveis termicamente por calor, durante a tarde.

A temperatura média radiante e a temperatura do ar apresentam valores de forma geral semelhantes para os três sistemas de controlo, não influenciando as condições de conforto térmico.

Utilizando o sistema de superfícies radiantes GEO (T) para a sala 16, é garantido o conforto térmico durante todo o dia, exceto num curto período no início da manhã, por valores negativos do índice PMV.

Apenas com as superfícies radiantes horizontais, GEO (H), o índice PMV mantém-se sempre dentro dos limites da categoria C durante a manhã, mas o sistema não é adequado para esta sala no período da tarde, permitindo a subida do índice PMV acima do limite máximo de +0,7. Porém, apresenta mais viabilidade técnica e económica, por utilizar menos recursos, tais como número de superfícies radiantes, água e custos de instalação do que o GEO com todas as superfícies, e obtém melhores resultados em outras salas.

A temperatura média radiante é sempre inferior à temperatura do ar, o que contribui positivamente para as condições de conforto térmico, o que ocorre devido à presença das superfícies radiantes arrefecidas.

- Condições de inverno

A Figura 4.11 apresenta a evolução do índice PMV para os vários tipos de sistemas AVAC simulados, aplicados ao edifício nº 1 do ISE, em condições de inverno, para a sala 79.

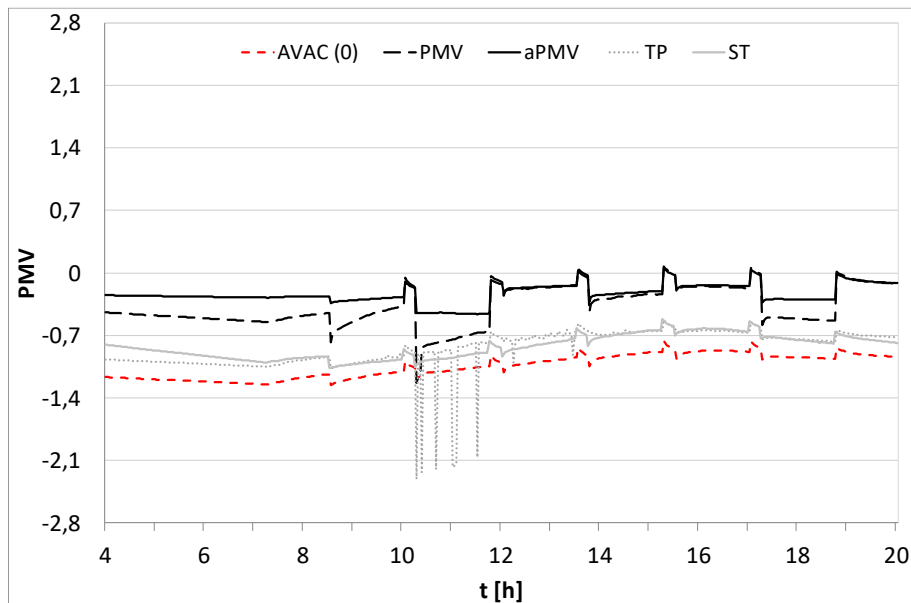


Figura 4.11: Evolução do índice PMV, de inverno, na sala 79 do edifício nº1 do ISE, para os sistemas AVAC analisados.

Com o sistema AVAC desligado, a sala 79 apresenta desconforto térmico por valores negativos do índice PMV ao longo do dia, com uma maior aproximação ao valor limite mínimo de -0,7 durante a parte da tarde, mas nunca chega a proporcionar condições de conforto térmico aceitáveis de acordo com a categoria C da norma ISO 7730 (2005).

O controlo PMV cria condições aceitáveis de conforto térmico por valores negativos do índice PMV durante a manhã, exceto um curto período entre as 10:00 e o meio-dia, com valores ligeiramente abaixo de -0,7, e boas condições durante o período da tarde. Globalmente tem bom desempenho nesta sala.

A evolução do índice de conforto revela que o controlo aPMV permite criar condições de conforto térmico adequadas aos ocupantes da sala 79, ao longo de todo o dia, com valores negativos do índice PMV superiores a -0,7.

A evolução do índice PMV, com o sistema AVAC controlado pela temperatura preferida apresenta valores inferiores a -0,7 para a sala 79 do edifício nº1 do ISE, proporcionando

condições de conforto térmico inaceitáveis em condições de inverno, durante a manhã, mas proporciona condições aceitáveis durante a tarde.

Para os três sistemas de controlo, a TMR é próxima da temperatura do ar, de modo geral, pelo que não influencia as condições de conforto térmico.

Quanto ao sistema ST (com coletores solares térmicos), os resultados indicam que não é totalmente eficaz a manter as condições de conforto térmico de forma consistente, durante todo o dia, em todas as salas. Daí resulta algum desconforto térmico moderado por frio na parte da manhã. A temperatura média radiante é sempre inferior à temperatura do ar, prejudicando as condições de conforto térmico.

Uma alternativa a esta abordagem seria instalar as superfícies radiantes num número limitado de salas ocupadas. A seleção dessas salas seria realizada em função dos resultados de conforto térmico obtidas nesta simulação, sendo escolhidas prioritariamente as que apresentam condições de conforto térmico inaceitáveis.

4.2.4 Edifício n.º 2 do Instituto Superior de Engenharia (ISE 2)

Para este edifício é analisada a sala 75, compartimento ocupado por um laboratório, com diferentes orientações, predominante a norte.

Qualidade do ar interior

A Figura 4.12 indica que a concentração de CO₂ se mantém sempre abaixo de 2250 mg/m³ nos compartimentos deste edifício, garantindo a QAI.

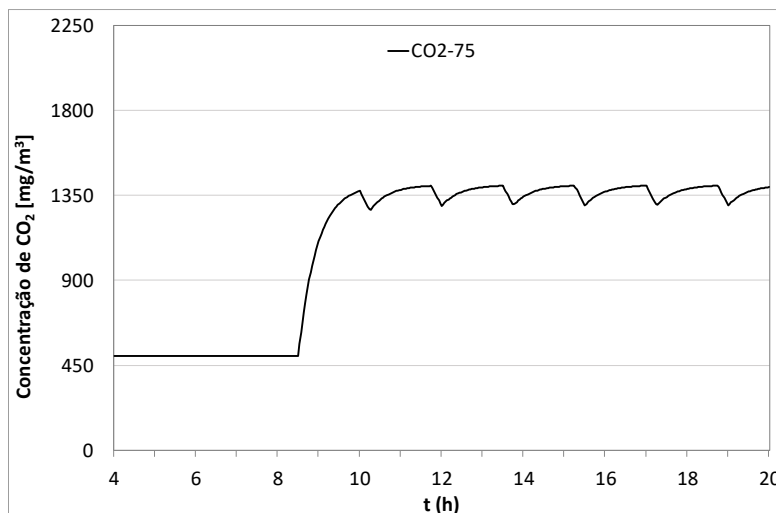


Figura 4.12 - Evolução da concentração de CO₂ para a sala 75 do edifício nº2 do ISE.

Conforto térmico

- Condições de verão

A Figura 4.13 mostra a evolução do índice PMV na sala 75(N), com os sistemas AVAC estudados, em condições de verão.

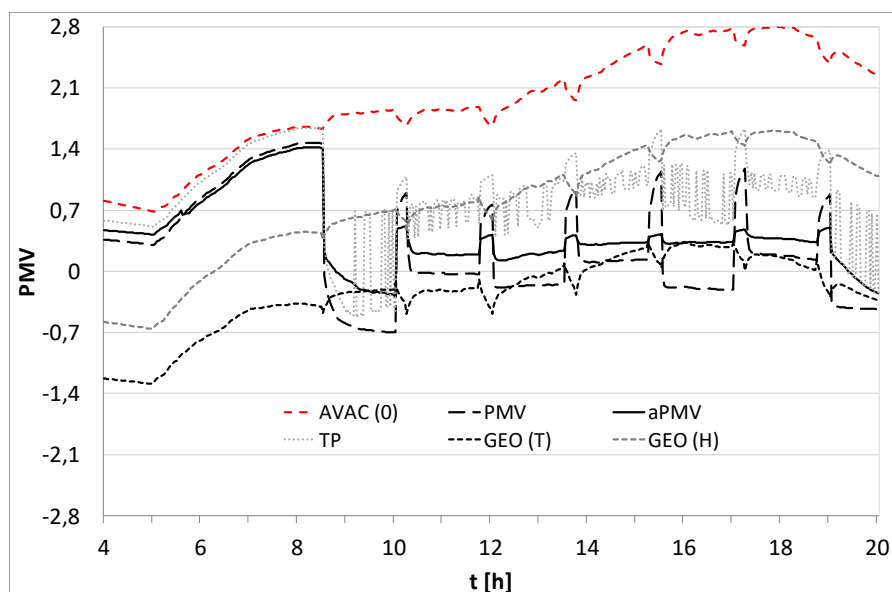


Figura 4.13: Evolução do índice PMV na sala 75 (N), de verão, na sala 75 do edifício n.º2 do ISE, para os sistemas AVAC analisados.

Com a sua resposta passiva (sistema AVAC desligado), as pessoas estão sempre termicamente desconfortáveis, por valores positivos do índice PMV, durante praticamente todo o dia. O índice PPD para esta e para muitas outras salas analisadas é quase sempre superior a 60%.

Quando o sistema AVAC é controlado pelo índice PMV as pessoas estão termicamente confortáveis durante todo o dia.

Com o controlo do sistema AVAC pelo índice aPMV, em condições de verão, são mantidas condições aceitáveis de conforto térmico durante todo o dia, nunca saindo do intervalo de conforto, com o índice PMV variando entre $-0,7$ e $+0,7$.

Quando se usa o controlo pela temperatura preferida, durante a manhã o conforto é mantido marginalmente, com valores em torno do limite máximo de $+0,7$; à tarde, porém, o sistema não consegue manter a sala confortável, com $PMV > +0,7$, de forma ainda moderada. O índice PPD de várias salas evolui de forma semelhante.

Em condições de verão, o sistema GEO (T) garante as condições de conforto térmico na sala 75, durante todo o dia. Em outras salas estudadas há desconforto térmico por valores negativos do índice PMV.

Com o sistema GEO (H) observa-se que os ocupantes se sentem termicamente confortáveis, na maior parte do dia, exceto no final da tarde, onde ocorre desconforto térmico por calor.

A TMR para os sistemas AVAC radiantes apresenta uma evolução por valores inferiores aos da temperatura do ar, afetando de modo positivo as condições de conforto térmico.

- Condições de inverno

A Figura 4.14 mostra a evolução do índice PMV para o edifício ISE 2, sala 75, para os sistemas AVAC analisados.

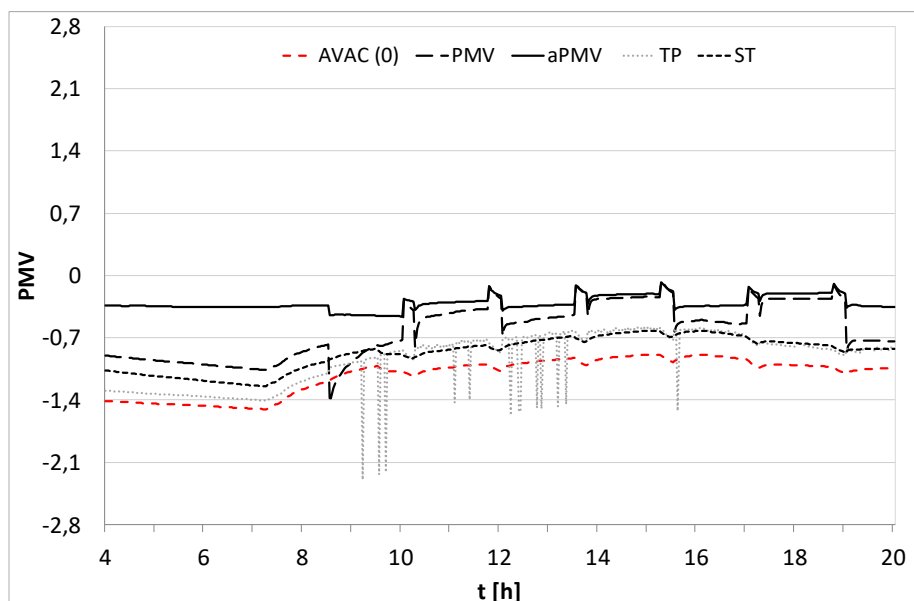


Figura 4.14: Evolução do índice PMV, de inverno, na sala 75 do edifício n.º2 do ISE, para os sistemas AVAC analisados.

Com o sistema AVAC desligado, de inverno, a sala 75 (N) é sempre desconfortável, por valores negativos do índice PMV, com valores em torno de -1,0 durante quase todos os períodos com ocupação.

Com o controlo PMV, em condições de inverno, as pessoas estão termicamente confortáveis na sala 75 (N), por valores negativos do índice PMV, exceto no primeiro período de ocupação da manhã (8:30 às 10:00), com ligeiro desconforto térmico.

No caso em se utiliza o sistema com controlo aPMV, o índice de conforto mantém-se em valores muito constantes acima de -0,7, o que indica que as condições de conforto térmico são aceitáveis.

Para o sistema controlado por TP (temperatura preferida), em condições de inverno, o índice PMV mantém-se em valores abaixo de -0,7 para a sala 75 (N), durante a manhã, gerando uma situação de desconforto térmico moderado, e proporciona condições aceitáveis para as pessoas durante a tarde. Nas restantes salas as condições de conforto térmico quase sempre não são aceitáveis durante alguns períodos.

Com o sistema com coletores solares térmicos (ST) a alimentar as superfícies radiantes a sala apresenta condições de ligeiro desconforto térmico de manhã, e mantém-se

confortável durante a tarde, mas o mesmo não ocorre para várias das outras salas deste edifício.

A temperatura média radiante apresenta valores inferiores aos da temperatura do ar, afetando de forma negativa o conforto térmico dos ocupantes. A TMR pode estar a ser influenciada pela presença de janelas com superfícies frias.

4.2.5 Edifícios do Complexo Pedagógico (CP)

É analisada a sala de aula 77 neste edifício, com orientação a nordeste.

Qualidade do ar interior

A evolução da concentração de dióxido de carbono na sala 77 (NE) é apresentada na Figura 4.15.

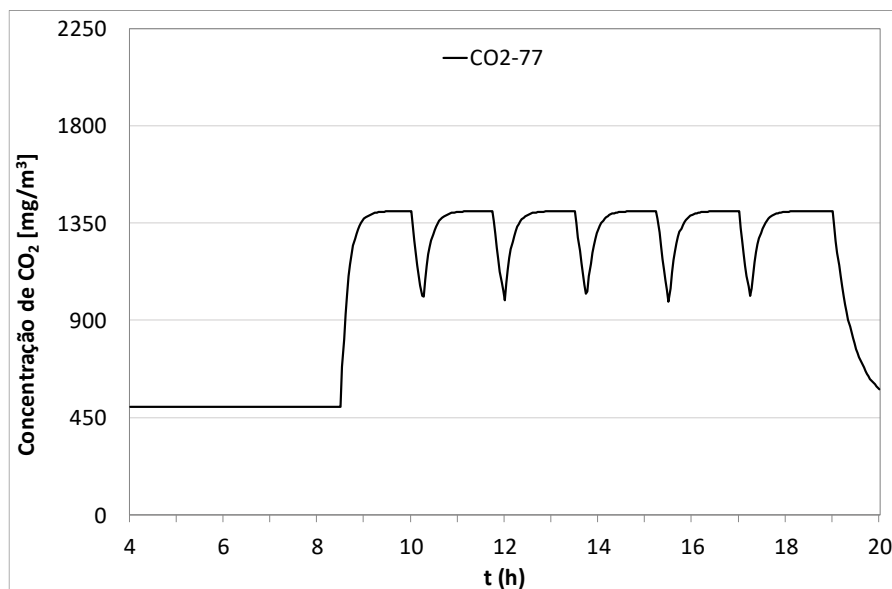


Figura 4.15 – Evolução da concentração de CO₂ para a sala 77 do Complexo Pedagógico.

Pode-se observar que a concentração de dióxido de carbono se mantém sempre em valores em torno dos 1400 mg/m³, logo inferiores ao limite de 2250 mg/m³, garantindo a qualidade do ar interior neste compartimento.

Conforto térmico

- Condições de verão

É apresentada na Figura 4.16 a evolução do índice de conforto térmico PMV para a sala 77 (NE), para todos os sistemas AVAC estudados.

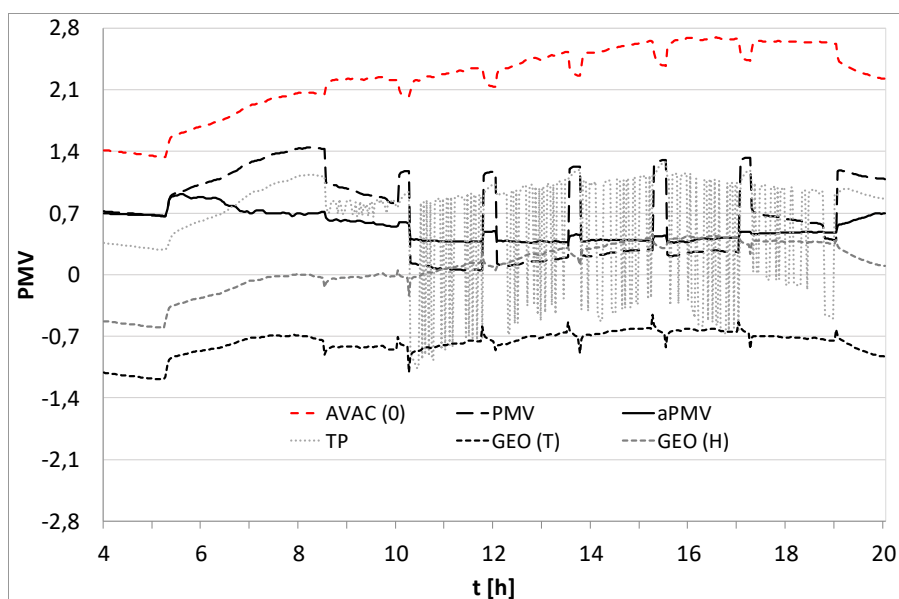


Figura 4.16 – Evolução do índice PMV, de verão, na sala 77 do Complexo Pedagógico, para os sistemas AVAC analisados.

Com o sistema AVAC desligado, todos os compartimentos apresentam condições inaceitáveis de conforto térmico por valores positivos do índice PMV, em condições de verão. A sala 77, de orientação nordeste, apresenta grande desconforto térmico por calor durante a manhã, e o crescimento do índice PMV é contínuo nesta sala, ao longo do dia, com condições muito desconfortáveis durante a tarde.

Com o sistema AVAC com controlo PMV os compartimentos apresentam condições de conforto térmico, por valores positivos do índice PMV, exceto no primeiro período de ocupação, das 8:30 às 10:00, onde os valores se mantêm acima de +0,7.

As condições de conforto térmico estão garantidas durante todo o período de ocupação para o sistema com controlo do índice aPMV, com este índice a evoluir por valores negativos, mas dentro dos limites da categoria C da norma ISO 7730 (2005).

Com o controlo pela temperatura preferida, o índice PMV vai crescendo durante o dia, ocorrendo condições de desconforto térmico ligeiro durante a manhã, e crescente durante a tarde, fazendo com que o índice PPD apresente valores que chegam a atingir 30%.

Para o GEO (T), sistema radiante de todas as superfícies com bombas de calor geotérmicas, estão garantidas as condições de conforto térmico, por valores negativos do índice PMV, mas acima do limite mínimo de -0,7.

O sistema GEO (H), em que só os tetos e pavimentos são radiantes, assegura valores do índice PMV dentro do intervalo definido pela categoria C, com valores em torno de zero durante a manhã e mais próximos do seu limite superior de +0,7 durante a tarde.

A temperatura média radiante evolui por valores inferiores aos da temperatura do ar com este sistema, favorecendo as condições de conforto térmico, o que pode ser explicado pela presença dos tetos e pavimentos arrefecidos.

- Condições de inverno

A evolução do índice PMV na sala 77 do Complexo Pedagógico, em condições de inverno, é mostrada na Figura 4.17 para os sistemas AVAC analisados.

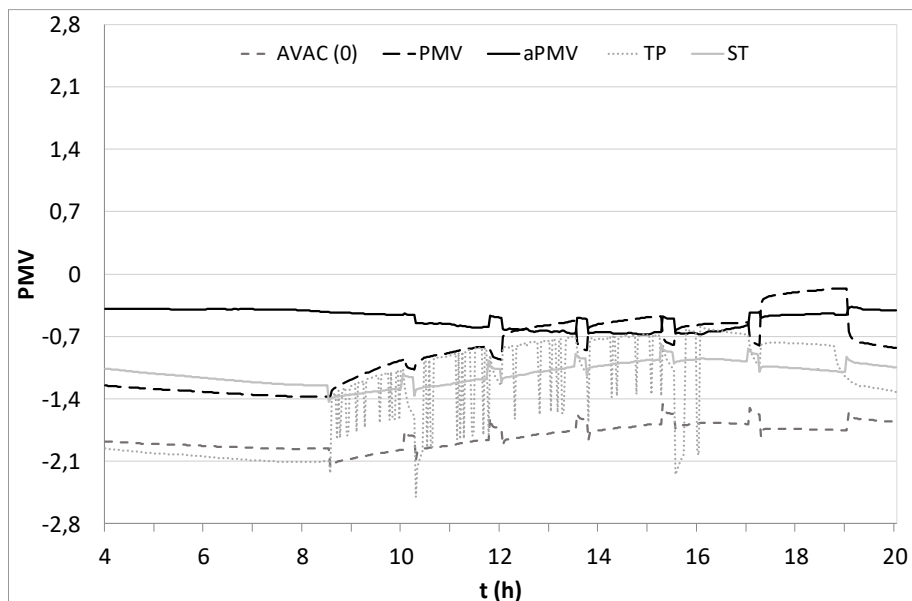


Figura 4.17: Evolução do índice PMV, de inverno, na sala 77 do Complexo Pedagógico, para os sistemas AVAC analisados.

Com o sistema desligado, AVAC (0), as condições de conforto térmico nesta sala são inaceitáveis em condições de inverno. O índice PPD confirma a análise, chegando a apresentar valores acima de 60% em alguns momentos.

O sistema de controlo pelo índice PMV não consegue proporcionar boas condições de conforto térmico no período da manhã, embora o índice PMV se vá progressivamente aproximando do limite mínimo definido na norma ISO 7730 (2005). No período da tarde são mantidas condições aceitáveis de conforto térmico para os ocupantes, com valores negativos do índice PMV, mas acima do limite mínimo de -0,7.

O controlo do índice aPMV obtém condições de conforto térmico aceitáveis durante toda o período de ocupação, por valores negativos do índice de conforto ($-0,7 < PMV < 0$). O índice PPD confirma esta indicação do índice PMV, com valores sempre inferiores a 15%. Este sistema revela-se muito eficaz a garantir as condições de conforto térmico para os ocupantes dos edifícios.

O sistema de controlo pela temperatura preferida, em condições de inverno, proporciona condições de conforto térmico aceitáveis, por valores negativos do índice PMV, aos ocupantes da sala 77 (NE), apenas durante a tarde, mantendo-se quase

constante em torno de -0,7. De manhã, as condições de conforto térmico são inaceitáveis, com desconforto térmico por frio moderado a forte.

A temperatura média radiante apresenta valores próximos dos da temperatura do ar para os três sistemas de controlo, não afetando de forma significativa o conforto térmico dos ocupantes dos compartimentos.

O sistema ST mantém os ocupantes termicamente desconfortáveis por frio durante todo o dia, mas o índice PMV sobe progressivamente ao longo do dia, reduzindo o desconforto térmico sem nunca atingir os valores do intervalo de conforto definida pela categoria C da norma ISO 7730 (2005). Este sistema não consegue, sem outro apoio, manter as condições de conforto térmico aceitáveis.

A temperatura média radiante evolui por valores inferiores aos da temperatura do ar, como acontece para os outros edifícios com este sistema.

4.2.6 Edifício dos Serviços de Ação Social (SAS)

Para este edifício são analisadas as condições de conforto térmico e da QAI de uma secretária, compartimento n.º 62 (S). Recorde-se que este edifício não inclui salas de aula.

Qualidade do ar interior

A evolução da concentração de dióxido de carbono na sala 62 (SE) é apresentada na Figura 4.18.

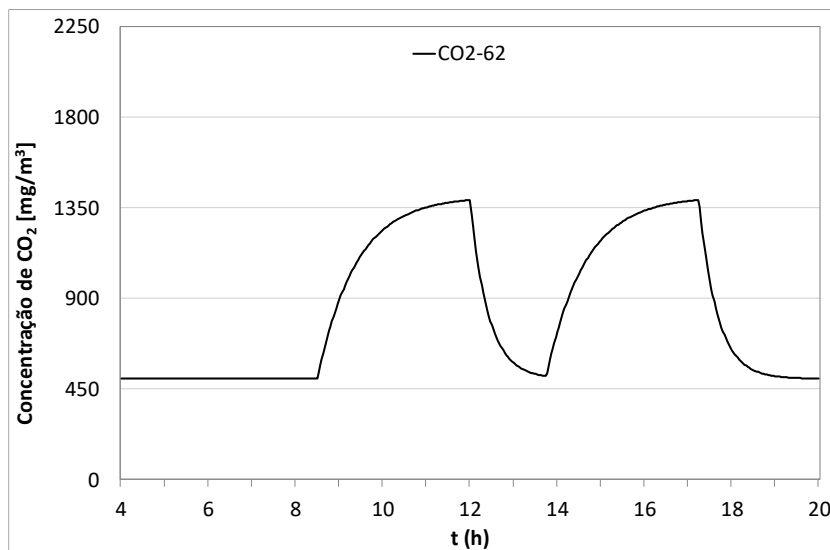


Figura 4.18 – Evolução da concentração de CO₂ para a sala 62 do edifício SAS.

Como se pode verificar na Figura 4.18 a evolução da concentração de CO₂ é aceitável, já que o seu valor se mantém abaixo do limite regulamentar, sempre substancialmente abaixo de 2250 mg/m³. A evolução da concentração de dióxido de carbono neste compartimento é diferente da apresentada nos compartimentos dos outros edifícios é causada pelos diferentes períodos de ocupação, já que se trata de uma secretaria, e não de uma sala de aulas.

Conforto térmico

- *Condições de verão*

Os gráficos da evolução do índice PMV resultantes das diversas simulações dos sistemas AVAC são mostrados na Figura 4.19, para a sala 62 (S) do edifício dos SAS.

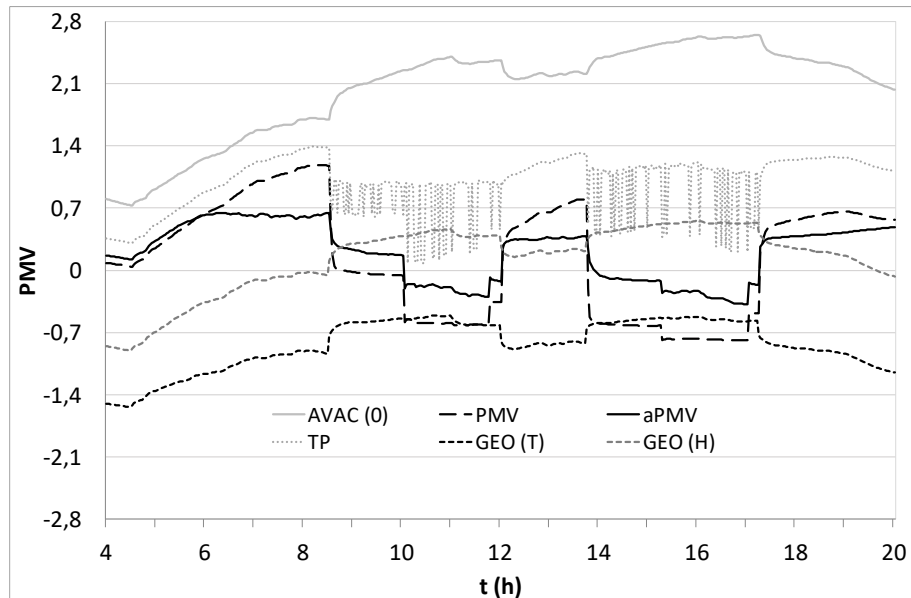


Figura 4.19: Evolução do índice PMV, de verão, na sala 62 do edifício SAS, para os sistemas AVAC analisados.

As condições de conforto térmico são inaceitáveis, em condições de verão, com o sistema AVAC desligado, porque os valores do índice PMV são sempre superiores a 0,7, e crescentes durante a tarde. Salas com orientações diferentes do Sul apresentam desconforto térmico menos acentuado.

Com controlo do índice PMV as condições de conforto térmico são aceitáveis durante todo o dia, em condições de verão.

O controlo do índice aPMV também assegura que a sala é mantida com condições de conforto térmico aceitáveis, em condições de verão, com valores do índice PMV sempre dentro dos limites da categoria C da ISO 7730 (2005), para todas as salas.

O sistema de controlo pela temperatura preferida não consegue evitar desconforto térmico moderado por calor durante todos os períodos com ocupação.

A TMR apresenta valores semelhantes aos da temperatura do ar, não afetando as condições de conforto térmico para os três sistemas de controlo analisados.

Com o sistema GEO (T), de verão, a sala 62 (S) apresenta condições de conforto térmico aceitáveis. O sistema parece arrefecer de forma excessiva o ambiente em outras salas que foram analisadas.

Com o sistema GEO (H) as condições de conforto térmico da sala 62 são aceitáveis, assim como para as restantes. A sala 62 é a que apresenta sempre as melhores condições de conforto térmico.

A TMR, sempre inferior à temperatura do ar, geralmente influencia positivamente as condições de conforto térmico, mas para algumas salas deste edifício acaba por ser excessivo, se for utilizado o GEO (T), com todas as superfícies radiantes.

- Condições de inverno

A Figura 4.20 apresenta a evolução do índice PMV para a sala 62 do edifício SAS, em condições de inverno, para os sistemas AVAC analisados.

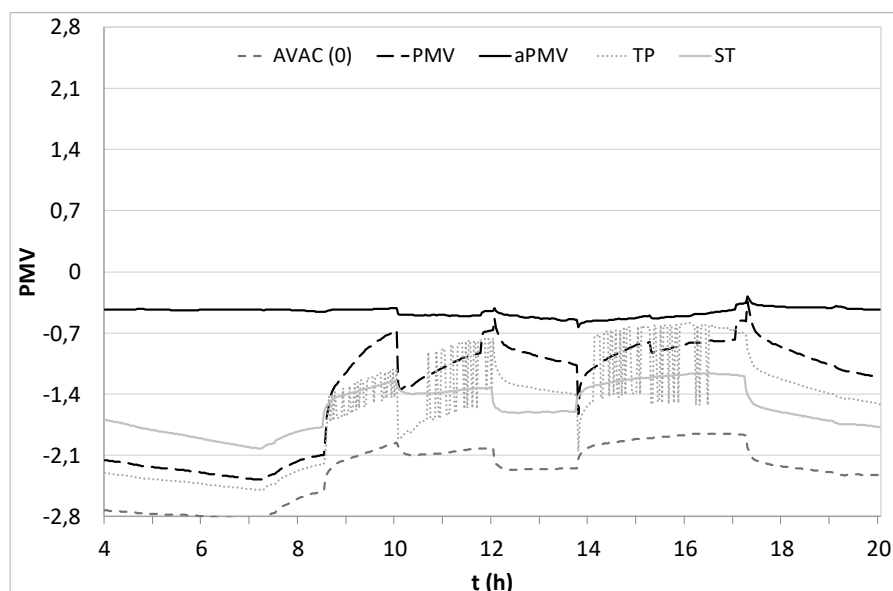


Figura 4.20: Evolução do índice PMV, de inverno, na sala 62 do edifício SAS, para os sistemas AVAC analisados.

Tal como se verifica para as condições de verão, com o sistema AVAC desligado a sala 62 é muito desconfortável, com valores do índice PMV muito abaixo do mínimo aceitável (-0,7) em todo o período ocupado.

Para o sistema controlado pelo índice PMV, em condições de inverno, a sala 62 (S) permanece quase sempre em desconforto térmico moderado, por valores inferiores a -0,7. Neste edifício, de inverno, o sistema não é eficaz a manter as condições de conforto térmico de forma consistente. A temperatura média radiante apresenta quase

sempre valores inferiores aos da temperatura do ar, prejudicando as condições de conforto térmico.

Em condições de inverno, as condições de conforto térmico proporcionadas pelo controlo aPMV são boas, sempre por valores negativos do índice aPMV. O índice PPD permanece, tal como em condições de verão com este sistema, sempre em valores inferiores ao limite de 15% da categoria C.

O sistema de controlo pela temperatura preferida produz desconforto térmico moderado de manhã, e obtém resultados progressivamente melhores ao longo do dia, proporcionando condições aceitáveis durante a tarde.

Os valores da temperatura média radiante são semelhantes aos da temperatura do ar, pelo que não influenciam as condições de conforto térmico, para os sistemas de controlo aPMV e TP.

O sistema ST não é eficaz a assegurar as condições de conforto térmico estipuladas, dentro dos limites da categoria C da ISO 7730 (2005), apresentando desconforto térmico por frio ao longo do dia. A temperatura média radiante, com valores próximos aos da temperatura do ar, não afeta as condições de conforto térmico para este sistema.

Discussão de resultados

A qualidade do ar interior é mantida em todos os edifícios, em termos da concentração de dióxido de carbono, sempre abaixo do valor limite (2250 mg/m³) do regulamento nacional, o RECS (2013).

A resposta térmica passiva dos edifícios (sistemas AVAC desligados) proporciona condições muito desconfortáveis em todas as salas estudadas, em todos os edifícios.

O sistema de controlo com o índice PMV consegue, de modo geral, garantir boas condições de conforto térmico aos ocupantes, tal como o sistema com controlo aPMV, que é o melhor neste ponto. O sistema de controlo pela temperatura preferida é mais eficaz a manter as condições de conforto térmico em condições de verão do que em condições de inverno.

O sistema GEO(T), ao contrário do GEO (H), que são usados em condições de verão, arrefece de forma excessiva e desnecessária em alguns casos, enquanto o segundo apresenta como desvantagem o facto de não conseguir proporcionar condições de conforto em boa parte das situações, por insuficiente capacidade de arrefecimento.

O sistema ST, usado em condições de inverno, consegue apresentar melhorias nas condições de conforto térmico proporcionadas aos ocupantes, quando comparado com o caso em que os sistemas estão desligados. No entanto, não consegue assegurar condições aceitáveis para todos os espaços.

4.3 Horas de desconforto térmico e QAI

Neste ponto é apresentada a análise do somatório das horas de desconforto térmico por frio, por calor e por qualidade do ar interior (QAI). Este procedimento permite uma avaliação comparativa, de forma objetiva e globalizante, da eficácia de cada método estudado, em termos da sua contribuição para assegurar as condições de conforto térmico dos ocupantes dos compartimentos. Os valores relativos às horas de desconforto térmico, por frio (HDF) ou por calor (HDC), e pela insuficiente QAI, no presente trabalho designadas por HDQA, foram calculados pelo programa de simulação dinâmica de edifícios, de acordo com as equações e a fundamentação teórica apresentada no ponto 2.8.3.

4.3.1 Horas de desconforto por qualidade do ar interior

Não houve horas de desconforto por QAI, porque a concentração de CO₂ não ultrapassou o limite regulamentar de 2250 mg/m³ (RECS, 2013), em nenhuma das salas, porque os caudais de ventilação utilizados foram suficientes para realizar a renovação de ar necessária. Ou seja, HDQA = 0, para todos os casos.

4.3.2 Horas de desconforto térmico

Apresentam-se neste ponto as horas de desconforto térmico que foram calculadas em todas as simulações realizadas, para os edifícios analisados. Os valores para estas horas de desconforto foram coligidos de forma a ser possível comparar de forma dissociada os resultados obtidos para as salas de aulas e gabinetes de cada edifício estudado. As siglas usadas nos gráficos de horas de desconforto térmico e consumos para representar os diversos sistemas AVAC utilizados são apresentadas no ponto 4.2.

Edifício da Escola Superior de Educação e Comunicação

A Figura 4.21 apresenta as horas de desconforto térmico por calor (HDQ) para os vários tipos de sistemas AVAC, em condições de verão, para o edifício ESEC.

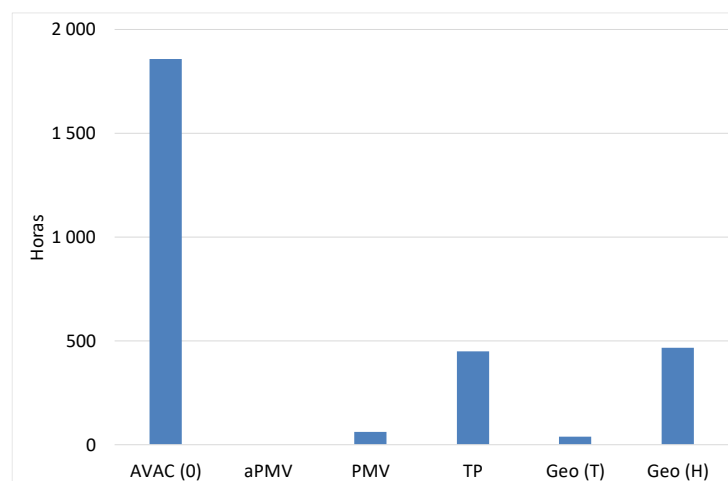


Figura 4.21: Valores de horas de desconforto térmico por calor para o edifício ESEC, no verão.

Verificou-se que a resposta passiva deste edifício, com os sistemas AVAC desligados, leva a que os ocupantes se sintam desconfortáveis em boa parte do dia. No verão, praticamente não ocorrem condições de desconforto térmico por frio. Por outro lado, atingem-se valores muito elevados de horas de desconforto térmico por calor, o que não surpreende.

Em condições de verão, o uso de qualquer dos sistemas de controlo dos sistemas AVAC analisados neste estudo permite reduzir as horas de desconforto térmico por calor.

O sistema de controlo do índice aPMV elimina 100% das horas de desconforto térmico por calor (HDQ), no verão; o controlo com o índice PMV e o sistema baseado em todas as superfícies radiantes alimentadas por bombas de calor geotérmicas, GEO (T), também conseguem muito bons resultados, eliminando quase a totalidade das HDQ e o controlo TP (temperatura preferida) e o sistema GEO (H) eliminam cerca de 75% das HDQ,

A Figura 4.22 apresenta as horas de desconforto térmico por frio (HDF) para os vários tipos de sistemas AVAC, em condições de inverno, para o edifício ESEC.

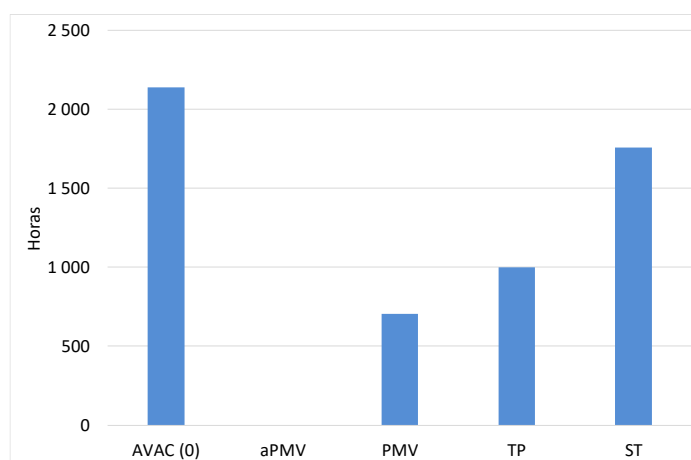


Figura 4.22: Horas de desconforto térmico por frio, no inverno, para o edifício ESEC.

Em condições de inverno, o controlo aPMV é o mais eficaz, porque elimina 100% das horas de desconforto térmico por frio (HDF), o controlo do índice PMV 67%, o controlo pela temperatura preferida 53%, e o sistema ST com coletores solares térmicos alimentados por bombas de calor geotérmicas (ST) é o menos eficaz, eliminando menos de 20% das HDF.

Escola Superior de Gestão, Hotelaria e Turismo

Na Figura 4.23 estão representadas as horas de desconforto térmico por calor em condições de verão, para os vários tipos de sistemas analisados, para o edifício ESGHT.

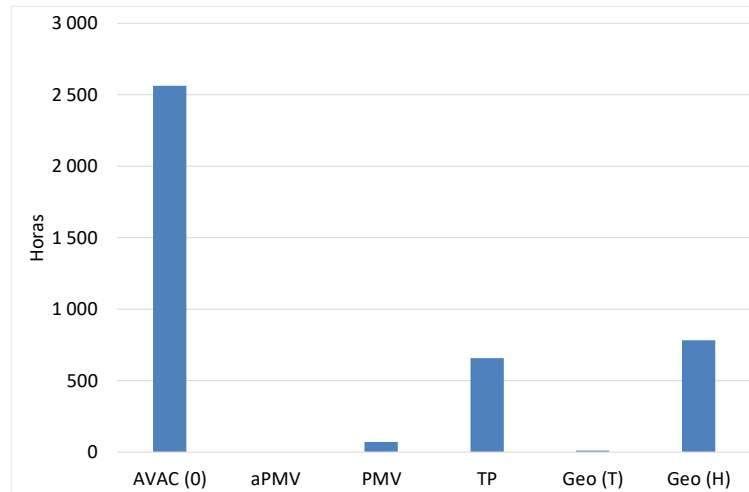


Figura 4.23: Horas de desconforto térmico por calor, no verão, para o edifício ESGHT.

As reduções nos valores das horas de desconforto térmico por calor (HDQ) neste edifício são de 100%, com o controlo do índice aPMV e com o sistema GEO(T), de todas as superfícies radiantes, 97% com o controlo do índice PMV, 74% com o controlo pela temperatura preferida e o menos eficaz é o de superfícies radiantes horizontais, GEO(H), com uma redução de 70%.

As horas de desconforto térmico por frio, no inverno, para o edifício ESGHT, são apresentadas na Figura 4.24.

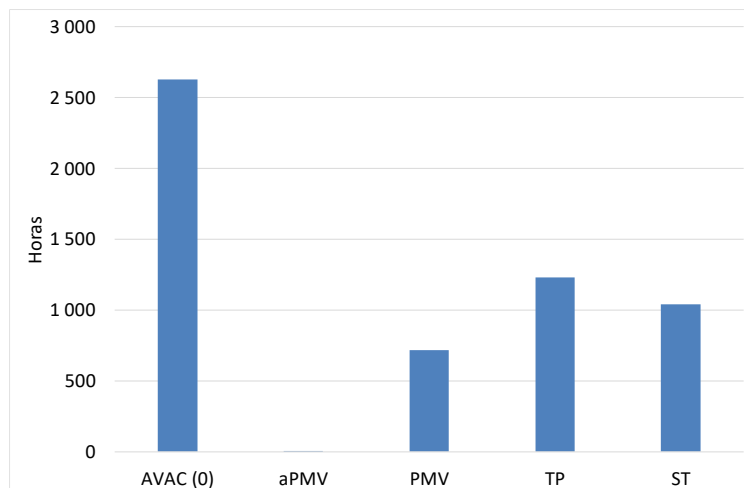


Figura 4.24: Horas de desconforto térmico por frio para o edifício ESGHT, no inverno.

O edifício ESGHT apresenta, tal como os restantes, valores de horas de desconforto térmico por frio (HDF) elevados, no inverno, em termos da sua resposta passiva.

Ao ser utilizado o sistema AVAC consegue-se uma redução de 53% das HDF com o controlo pela temperatura preferida, 73% com o controlo pelo índice PMV, e não há horas de desconforto térmico por frio com o controlo pelo índice aPMV. Os sistemas de superfícies radiantes alimentadas por coletores solares térmicos (ST) conseguem uma redução das HDF ligeiramente superior ao sistema de controlo pela temperatura preferida.

Edifício n.º 1 do Instituto Superior de Engenharia

Na Figura 4.26 estão representadas as horas de desconforto térmico por calor em condições de verão, para os vários tipos de sistemas analisados, para o edifício ESGHT.

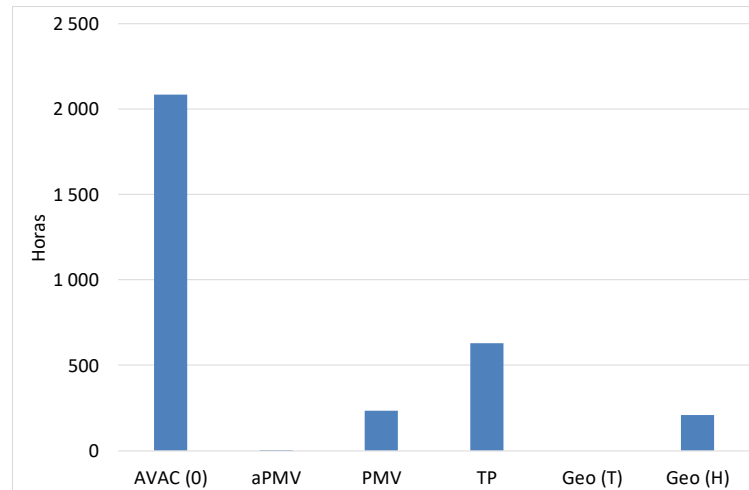


Figura 4.25: Horas de desconforto térmico por calor para o edifício ISE 1, no verão.

No que diz respeito aos sistemas de controlo, todos reduzem as horas de desconforto térmico. O controlo do índice aPMV é o mais eficaz, praticamente eliminando o desconforto térmico, seguido do sistema de controlo pelo índice PMV, com valor baixo de HDQ; o menos eficaz a reduzir as horas de desconforto térmico por calor é o sistema de controlo pela temperatura preferida. Este sistema consegue, mesmo assim, reduções de 70% nas HDQ. O sistema com todas as superfícies radiantes, GEO (T) elimina totalmente as horas de desconforto térmico por calor e o sistema GEO (H) tem um desempenho semelhante ao do controlo do índice PMV neste ponto.

Na Figura 4.26 estão representadas as horas de desconforto térmico por frio em condições de inverno, para o edifício ESGHT.

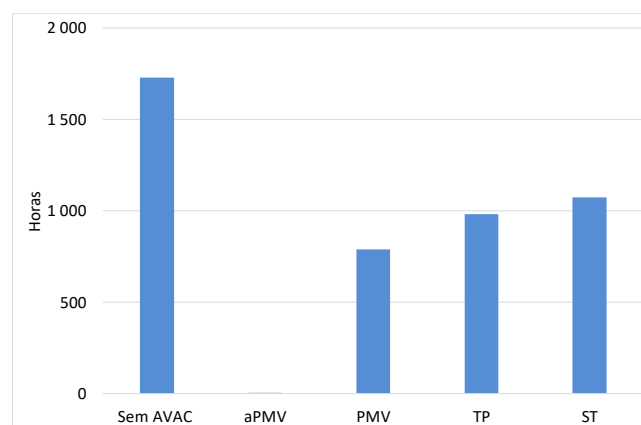


Figura 4.26: Horas de desconforto térmico por frio para o edifício ISE 1, no inverno.

O sistema de controlo do índice aPMV é o que apresenta melhores prestações a reduzir o desconforto térmico por frio em condições de inverno, com valores praticamente nulos de HDF. O controlo do índice PMV reduz em 54% as HDF que ocorrem com o sistema AVAC desligado, enquanto o sistema de controlo pela temperatura preferida obtém uma diminuição menos significativa, de apenas 43%. O sistema ST de superfícies radiantes alimentadas por coletores solares térmicos consegue uma redução das horas de desconforto térmico ligeiramente inferior aos obtidos pelo sistema de controlo da temperatura preferida.

Edifício n.º 2 do Instituto Superior de Engenharia

Na Figura 4.27 estão representadas as horas de desconforto térmico por calor em condições de verão, para o edifício ISE2.

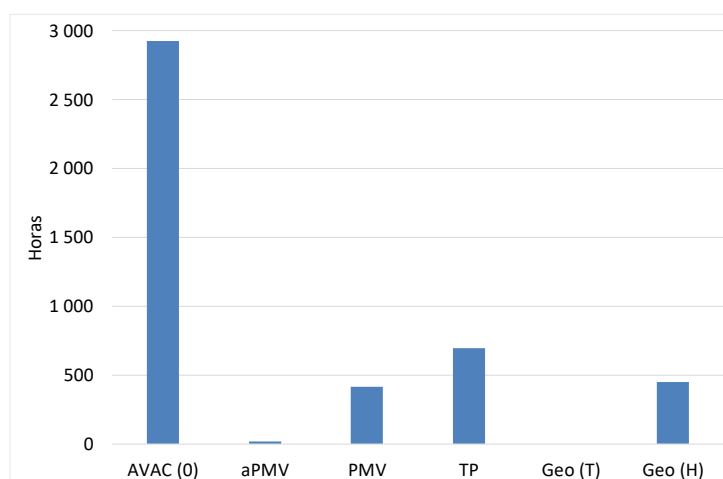


Figura 4.27 – Horas de desconforto térmico por calor para o edifício ISE 2, no verão.

O sistema de controlo do índice aPMV quase elimina as horas de desconforto térmico por calor (HDQ) e o sistema GEO(T), com todas as superfícies radiantes consegue mesmo eliminar as HDQ completamente. O sistema de controlo do índice PMV e o GEO(H), só com superfícies radiantes horizontais, têm bons desempenhos, reduzindo em mais de 80% as HDQ. O sistema de controlo pela temperatura preferida é o que reduz menos as horas de desconforto (76%).

Na Figura 4.28 estão representadas as horas de desconforto térmico por frio, em condições de inverno, para o edifício nº 2 do ISE.

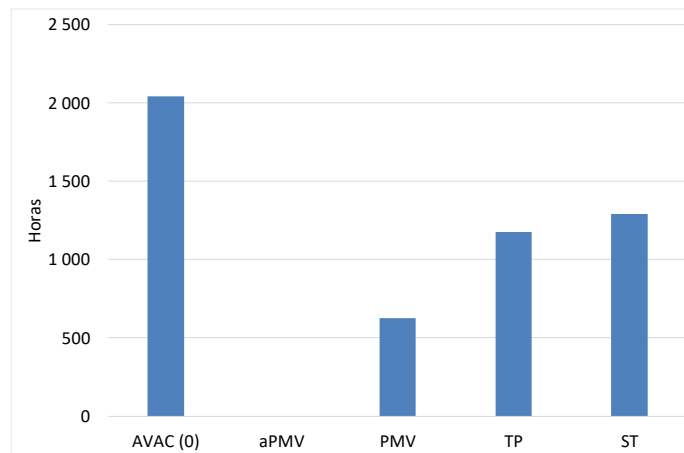


Figura 4.28 – Horas de desconforto térmico por frio para o edifício ISE 2, no inverno.

O sistema de controlo pelo aPMV obtém resultados excelentes, praticamente sem horas de desconforto térmico por frio, em condições de inverno, enquanto o sistema de controlo do índice PMV reduz em cerca de 40% as HDF, e os sistemas de superfícies radiantes ST cerca de 55%.

Complexo Pedagógico

Na Figura 4.29 estão representadas as horas de desconforto térmico por calor em condições de verão, para o edifício ISE2.

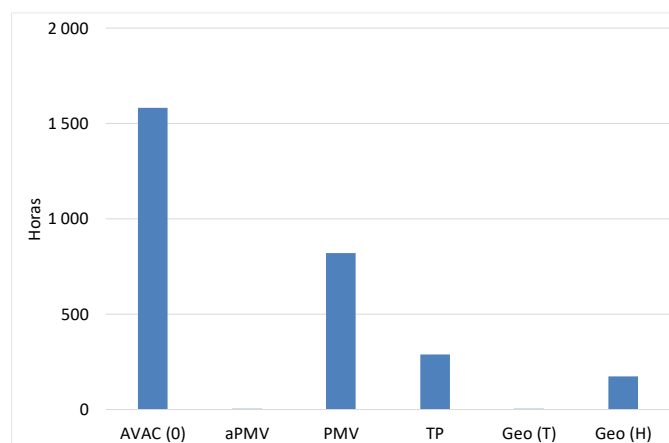


Figura 4.29: Horas de desconforto térmico por calor para o edifício ISE 2, no verão.

O sistema GEO(T) e o sistema de controlo do índice aPMV são 100% eficazes a eliminar as horas de desconforto térmico por calor, em condições de verão. O GEO(H) e o controlo da temperatura preferida também conseguem boas reduções, e o controlo do índice PMV só reduz cerca de 50% das HDQ.

Na Figura 4.30 estão representadas as horas de desconforto térmico por frio em condições de inverno, para o edifício ISE2.

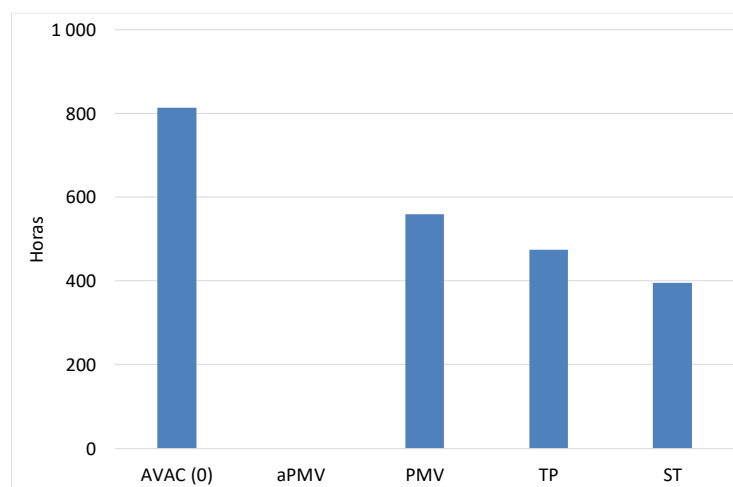


Figura 4.30 – Horas de desconforto térmico por frio para o edifício CP, no inverno.

O controlo aPMV elimina 100% das horas de desconforto térmico por frio (HDF), em condições de inverno. O sistema de controlo do índice PMV reduz cerca de 20% das HDF, o sistema de controlo pela temperatura preferida reduz 40% e o ST, sistema de superfícies radiantes horizontais alimentadas por coletores solares térmicos reduz em cerca de 50% as HDF.

Edifício dos Serviços de Ação Social

Na Figura 4.31 estão representadas as horas de desconforto térmico por calor em condições de verão, para o edifício SAS.

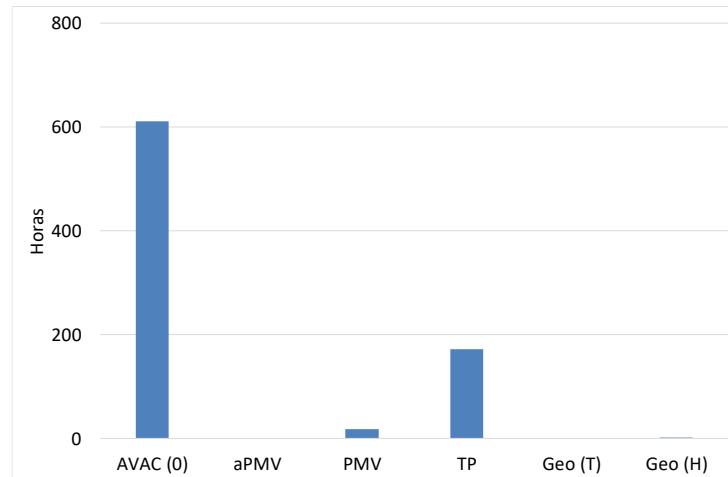


Figura 4.31: Horas de desconforto térmico por frio para o edifício SAS, no verão.

Na Figura 4.32 estão representadas as horas de desconforto térmico por frio em condições de inverno, para o edifício SAS.

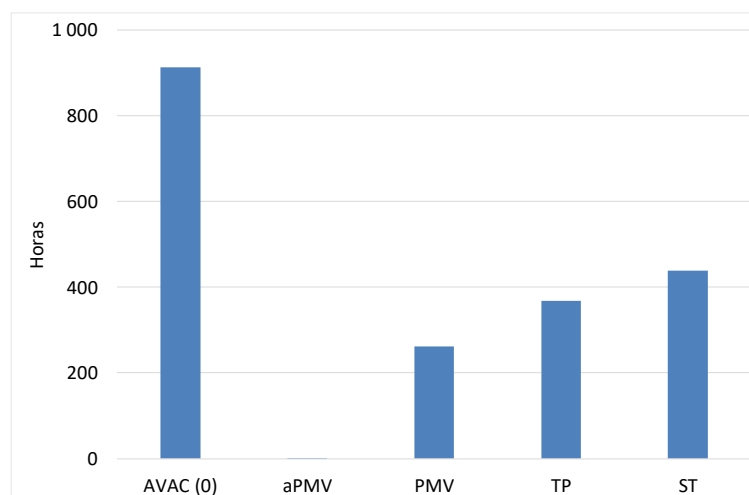


Figura 4.32 – Horas de desconforto térmico por frio para o edifício SAS, no inverno.

O sistema de controlo do índice aPMV quase elimina todas as horas de desconforto térmico, tanto por frio como por calor.

O sistema de controlo do índice PMV tem bons resultados na redução do desconforto térmico no verão, mas não consegue evitar, no dia típico de inverno, algumas horas de desconforto térmico por frio e, curiosamente, até um número residual de horas de desconforto térmico por calor.

O controlo pela temperatura preferida tem resultados medianos, eliminado cerca de dois terços das horas de desconforto térmico, com desempenho um pouco melhor no inverno.

Os sistemas de superfícies radiantes GEO(T) e GEO(H) quase eliminam as HDQ no verão, mas o sistema ST só reduz cerca de 50% das HDF, no inverno. No entanto, verificam-se horas de desconforto térmico por frio, quando se usam todas as superfícies radiantes, o que leva a concluir que esta solução causa um arrefecimento excessivo. Quando são usadas apenas as superfícies horizontais, reduzem-se as HDQ para 15% das que ocorrem quando os sistemas estão desligados, e não ocorrem horas de desconforto por valores negativos do índice PMV.

Comparação entre as horas de desconforto térmico dos vários edifícios

Esta análise permite comparar a resposta passiva dos edifícios, para saber quais os que apresentam as melhores condições de conforto térmico, sem a necessidade de utilização de sistemas AVAC, ou outras formas de fornecimento da energia térmica (de aquecimento ou de arrefecimento) necessária para assegurar o conforto.

Os resultados obtidos para os totais das horas de desconforto térmico por calor no verão, por edifício, com os sistemas AVAC desligados, são apresentados na Figura 4.33.

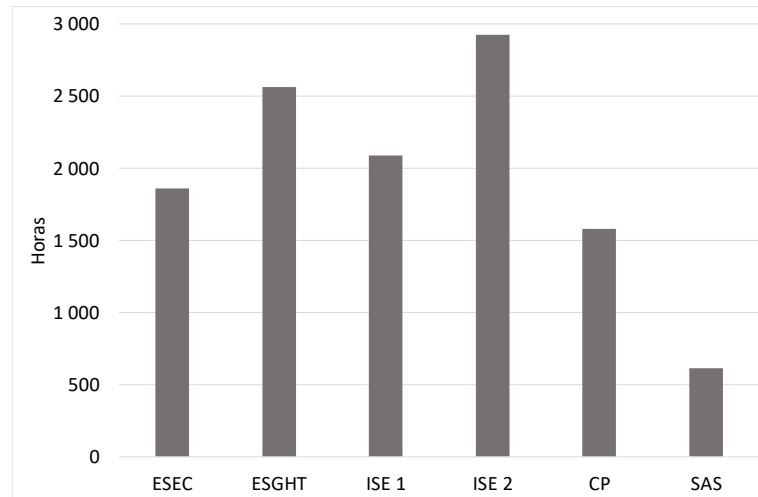


Figura 4.33: Total de horas de desconforto térmico por calor nos edifícios estudados, no verão, com os sistemas de AVAC desligados.

Verifica-se que o edifício com maior somatório de horas de desconforto térmico por calor no verão é o edifício nº 2 do ISE, seguido do edifício da ESGHT. O edifício que apresenta menos HDQ é o edifício SAS.

Os resultados obtidos para as horas de desconforto térmico por frio, no inverno, dos edifícios estudados, com os sistemas AVAC desligados, são apresentados na Figura 4.34.

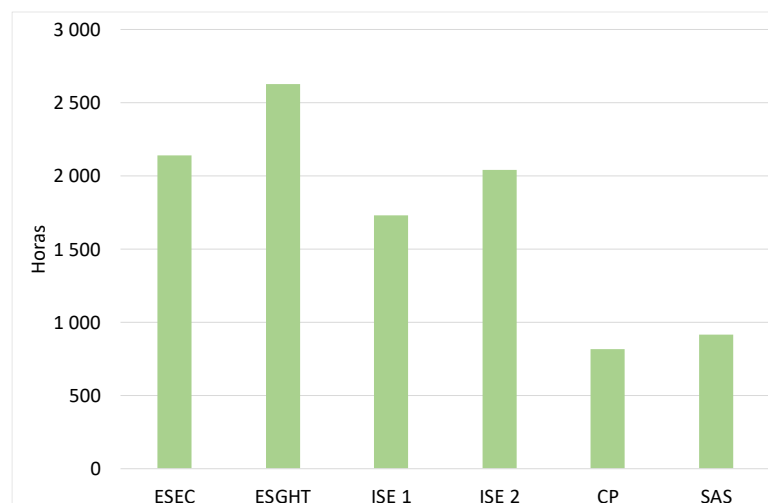


Figura 4.34: Total de horas de desconforto térmico por frio nos edifícios estudados, no inverno, com os sistemas de AVAC desligados.

Em condições de inverno, o edifício mais desconfortável é o CP, seguido do SAS, e o mais desconfortável é o ESGHT.

Foram somadas as horas de desconforto térmico por frio no verão (HDQ) com as horas de desconforto por frio no inverno (HDF), para analisar os edifícios em termos da sua resposta ao longo do ano. Para uma análise mais completa, seria necessário realizar simulações em condições de primavera e de outono, o que não coube no âmbito deste trabalho.

A Figura 4.35 apresenta os valores de HDQ+HDF por edifício, com os sistemas AVAC desligados.

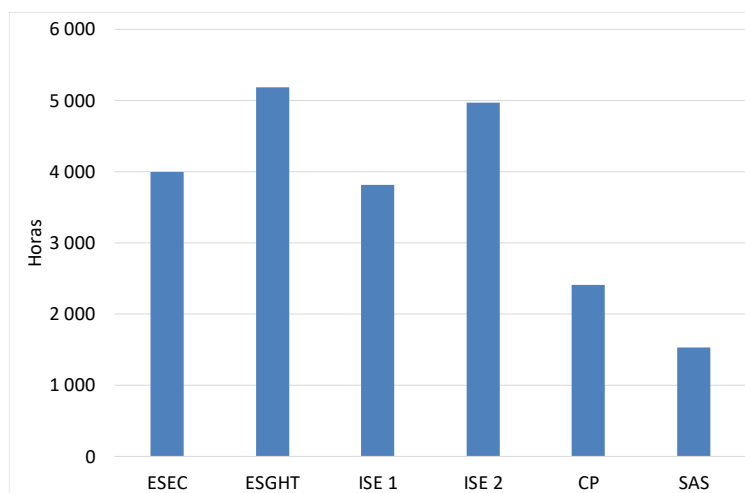


Figura 4.35: Total de horas de desconforto térmico, por frio e por calor, nos edifícios estudados, no inverno e no verão, com os sistemas de AVAC desligados.

Pode-se ver que o edifício com mais de horas de desconforto térmico é o da ESGHT, seguido de perto pelo ISE 2. Os menos desconfortáveis, são o edifício SAS e o Complexo Pedagógico.

Realizando a análise por outro prisma, foi calculado um coeficiente de desconforto térmico específico, dividindo as horas de desconforto térmico totais (HDQ+HDF) pela área total de cada edifício. A unidade deste coeficiente será horas/m².

Na Figura 4.36 é apresentada a comparação dos totais de horas de desconforto térmico de cada edifício (HDQ+HDF), dividida pela sua área total.

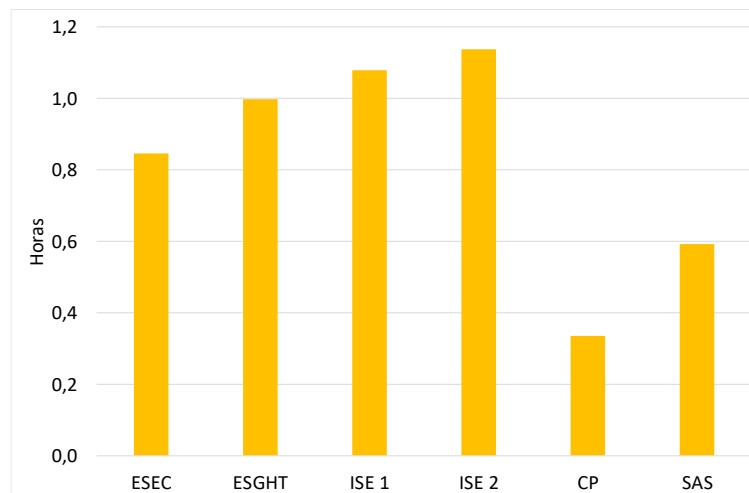


Figura 4.36: Total de horas de desconforto térmico por unidade de área dos edifícios, [h/m²].

O edifício que apresenta maior coeficiente de desconforto térmico específico por unidade de área é o edifício nº2 do ISE, seguido do nº1 do ISE. Os menos desconfortáveis termicamente em relação à sua área total são os do Complexo Pedagógico e o dos Serviços de Ação Social.

Discussão de resultados

A análise da performance dos sistemas AVAC e radiantes estudados, em termos das horas de desconforto térmico permite verificar que:

A não utilização de sistemas AVAC ou outras soluções ativas que proporcionem conforto térmico aos ocupantes não é aceitável para estes edifícios, porque a sua arquitetura revela um desempenho insuficiente nestas condições, com muitas horas de desconforto térmico por frio e por calor, conforme a estação.

O sistema AVAC com controlo do índice aPMV é o mais eficaz a eliminar as horas de desconforto térmico, em todas as situações, conseguindo eliminar a quase totalidade das horas de desconforto térmico, tanto por frio, como por calor.

O sistema de controlo do índice PMV não é tão eficaz como o do índice aPMV. Tem melhores desempenho no verão do que no inverno, e é mesmo bastante eficaz, de verão, nos edifícios ESEC e ESGHT.

O controlo pela temperatura preferida é dos três o que tem resultados menos conseguidos a reduzir o desconforto térmico, sempre piores no inverno que no verão, tal como o do índice PMV. Mesmo de verão, os seus resultados raramente são totalmente satisfatórios. No entanto, consegue reduzir sempre mais de metade das horas de desconforto térmico que ocorreriam sem sistema AVAC, e, em vários casos, apresenta desempenho muito próximo do sistema de controlo do índice PMV.

Os sistemas GEO(T) e GEO(H), com superfícies radiantes e bombas de calor geotérmicas são muito eficazes a reduzir o desconforto térmico dos ocupantes, de verão. O sistema que usa todas as superfícies chega mesmo a provocar arrefecimento excessivo e ocorrem algumas horas de desconforto térmico por frio.

O sistema ST, superfícies radiantes alimentadas por coletores solares térmicos, consegue resultados apenas razoáveis a eliminar as horas de desconforto térmico por frio, no inverno, não revelando um desempenho muito interessante no que diz respeito ao conforto térmico, mas pode ser utilizado em combinação com outra solução, como estratégia de redução da necessidade de aquecimento.

Em relação ao desempenho passivo dos edifícios, em termos do conforto proporcionado aos seus ocupantes sem a utilização de sistemas AVAC, pode-se verificar que:

O edifício ESEC tem um desempenho intermédio em relação aos outros edifícios, em termos do conforto térmico dos ocupantes.

O edifício ESGHT é o mais desconfortável, com o maior número de horas totais de desconforto térmico, seguido de perto pelo edifício ISE2. O edifício ISE1 também não apresenta uma *performance* muito melhor que os anteriores. Estes três edifícios têm algo em comum, que é o facto de terem sido dos primeiros a ser construídos, provavelmente com menos preocupação com o *design* sustentável. Outro ponto em comum é o facto de terem apenas um piso, à exceção do ISE1: nos edifícios com 2 pisos, os compartimentos do piso inferior são mais protegidos dos efeitos da radiação solar incidente nas coberturas ou telhados, e das perdas de calor, no inverno. Neste último caso está o edifício SAS, com um bom desempenho.

O edifício CP apresenta o melhor rácio de horas de desconforto térmico totais por unidade de área, o que pode ser explicado pelo facto ser de construção mais recente, com uma arquitetura mais favorável à manutenção do conforto térmico.

4.4 Consumos de Energia

Nesta secção são apresentados os resultados obtidos para os consumos de energia térmica e elétrica dos sistemas AVAC e analisa-se a relação entre os consumos reais, resultantes das medições, e os consumos obtidos numericamente.

A potência térmica consumida pelos sistemas AVAC, calculada pelo programa de simulação dinâmica, permite avaliar os desempenhos das diversas metodologias de controlo, em termos do seu contributo para uma maior eficiência energética, não descurando a manutenção de adequadas condições de conforto térmico. São comparados os consumos de energia térmica para os três sistemas de controlo, nomeadamente o do índice PMV, o do índice aPMV e o da temperatura preferida.

Para o cálculo da energia elétrica consumida pelos sistemas AVAC foram estimados valores do COP ou da EER dos equipamentos dos sistemas AVAC existentes nos edifícios do Campus. Essas hipóteses foram apresentadas no ponto 3.2.5.1. Procurou-se então validar os resultados dos consumos dos sistemas AVAC obtidos nas simulações numéricas por comparação com valores reais de consumo dos edifícios estudados.

Este estudo também compara os consumos totais dos diversos edifícios em condições de verão e de inverno, e ainda o total dos consumos (soma dos valores obtidos para o verão e o inverno). Será ainda calculado o que se pode chamar de consumo específico de cada edifício, que é obtido dividindo o consumo de energia em kWh pela área total do edifício em metros quadrados, permitindo comparar os resultados obtidos para os diferentes edifícios.

4.4.1 Consumos de energia térmica

Nesta secção serão apresentados os valores dos consumos de potência térmica (calculados numericamente nas simulações) nos compartimentos, com os diferentes sistemas de controlo dos sistemas de AVAC utilizadas. As simulações fornecem diretamente a informação da potência consumida, em cada momento, e a partir desses resultados calculam-se os valores da energia consumida ao longo do dia. Estes resultados são utilizados para efetuar uma análise comparativa dos consumos que ocorrem com os diversos sistemas de controlo dos sistemas AVAC.

A energia consumida em cada intervalo de tempo de cálculo do programa é calculada simplesmente pelo produto da potência (considerada constante em cada passo da simulação) pelo correspondente intervalo de tempo. As tabelas criadas para este tópico apresentam de forma muito compacta todos os resultados obtidos das diferentes simulações aos edifícios estudados. Incluem todos os resultados dos consumos calculados para os diferentes sistemas de controlo dos sistemas AVAC. As simulações dos sistemas radiantes não entram nesta secção do trabalho, por não envolverem consumos de energia térmica que possam ser analisados da mesma maneira.

Foram determinados os totais diários de consumos para cada compartimento, e desagregados os consumos referentes aos diferentes tipos de compartimentos, permitindo obter os totais para as salas de aulas, gabinetes dos docentes e outros funcionários. Foram também calculados os totais de consumo para cada edifício considerado, em junho e em dezembro.

Recorde-se que foi realizada uma simulação com o sistema AVAC desligado, para a obtenção da resposta passiva do edifício, e três simulações com sistemas AVAC equipados com diferentes sistemas de controlo, a saber, o do índice PMV, o do índice aPMV e o da temperatura preferida, visando uma análise comparativa dos consumos resultantes da aplicação destas três diferentes metodologias.

Foi possível verificar que, no caso em que os sistemas AVAC permanecem desligados, não há, como era previsível, qualquer consumo energético, tanto em condições de inverno como em condições de verão.

Escola Superior de Educação e Comunicação (ESEC)

Os consumos de energia térmica do edifício da Edifício da Escola Superior de Educação e Comunicação (ESEC) são apresentados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2: Energia térmica diária fornecida pelos sistemas AVAC do edifício ESEC [kWh/dia].

ESEC	aPMV		PMV		Temperatura preferida	
	Verão	Inverno	Verão	Inverno	Verão	Inverno
Total	-1297,2	1645,4	-1447,4	1815,4	-892,2	953,2
Aulas	-447,5	421,9	-502,6	467,9	-369,8	207,5
Gabinetes	-179,1	312,1	-192,6	358,1	-65,3	229,3

Com o controlo pelo índice PMV, os consumos são mais elevados, tanto em condições de verão, como em condições de inverno. Verifica-se que o sistema de controlo adaptativo (do índice aPMV) consegue uma diminuição de consumos de 10% e de 9%, respetivamente, no verão e no inverno, em relação aos obtidos com o controlo pelo índice PMV. O sistema de controlo pela temperatura preferida é o que alcança consumos mais reduzidos, com diminuições de 38% em condições de verão e de 47% em condições de inverno, em relação aos obtidos com o controlo pelo índice PMV.

Escola Superior de Gestão, Hotelaria e Turismo (ESGHT)

Os consumos de energia térmica do edifício da Edifício da Escola Superior de Educação e Comunicação (ESEC) são apresentados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3: Energia térmica diária fornecida pelos sistemas AVAC do edifício ESGHT [kWh/dia].

ESGHT	aPMV		PMV		Temperatura preferida	
	Verão	Inverno	Verão	Inverno	Verão	Inverno
Total	-1317	1517,3	-1510	1773,1	-910	967,8
Aulas	-475	414,0	-533	469,7	-387	173,6
Gabinetes	-314	441,5	-367	514,7	-196	331,8

Pode-se constatar que os consumos com o sistema de controlo pela temperatura preferida são 45% e 40% inferiores ao controlo PMV, de inverno e de verão, respetivamente, enquanto o controlo aPMV obtém consumos 13% menores no verão, e cerca de 14% inferiores no inverno do que o sistema de controlo do índice PMV, que é o que apresenta maiores consumos.

Edifício n.1 do Instituto Superior de Engenharia (ISE 1)

Os consumos de energia térmica do edifício da Edifício da Escola Superior de Educação e Comunicação (ESEC) são apresentados na Tabela 4.4.

Tabela 4.4: Energia térmica diária fornecida pelos sistemas AVAC do edifício n.º1 do ISE [kWh/dia].

ISE 1	aPMV		PMV		Temperatura preferida	
	Verão	Inverno	Verão	Inverno	Verão	Inverno
Total	-907,0	904,6	-1004,9	1056,2	-657,8	587,0
Aulas	-415,8	297,1	-456,6	323,8	-360,0	117,0
Gabinetes	-242,1	251,6	-274,6	307,0	-153,1	222,6

Observa-se que este edifício tem consumos muito idênticos de verão e de inverno. Em termos de eficiência energética, com o sistema de controlo da temperatura preferida apresenta consumos 35% inferiores no verão e 44% inferiores no inverno, aos obtidos com o sistema baseado no índice PMV, que apresenta os maiores consumos. O controlo do índice aPMV leva a consumos maiores do que os do sistema de controlo pela temperatura preferida, e menores que os do controlo do índice PMV.

Edifício n.2 do Instituto Superior de Engenharia (ISE 2)

Os consumos de energia térmica do edifício da Edifício da Escola Superior de Educação e Comunicação (ESEC) são apresentados na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 – Energia térmica diária fornecida pelos sistemas AVAC do edifício n.º 2 do ISE [kWh/dia].

ISE 2	aPMV		PMV		Temperatura preferida	
	Verão	Inverno	Verão	Inverno	Verão	Inverno
Total	-1351,5	1125,4	-1494,2	1295,2	-1040,6	545,6
Aulas	-218,8	120,8	-243,4	132,9	-181,2	21,3
Gabinetes	-183,5	331,9	-217,6	435,4	-167,1	328,5

É possível observar a tendência que indica que o sistema de controlo do índice PMV é o que causa maiores consumos, seguido do sistema de controlo pelo aPMV, e o mais eficiente é o sistema de controlo pela temperatura preferida. Com o sistema de controlo do índice aPMV, os valores são 10 % menores no verão e 13 % menores no inverno, em relação ao sistema de controlo do índice PMV; O sistema de controlo pela temperatura preferida apresenta consumos 30 % inferiores aos obtidos com o sistema de controlo do índice PMV, em condições de verão, e 58 % inferiores em condições de inverno.

Complexo Pedagógico (CP)

Os consumos de energia térmica do edifício da Edifício da Escola Superior de Educação e Comunicação (ESEC) são apresentados na Tabela 4.6.

Tabela 4.6: Energia térmica diária fornecida pelos sistemas AVAC do edifício CP [kWh/dia].

CP	aPMV		PMV		Temperatura preferida	
	Verão	Inverno	Verão	Inverno	Verão	Inverno
Total	-2761,4	2037,0	-3212,9	2263,8	-1966,8	1283,7
Aulas	-1234,8	878,3	-1413,9	999,3	-996,5	575,4
Gabinetes	-11,3	22,1	-11,7	24,3	-0,1	21,5

Em dia típico de verão o sistema de controlo que causa maiores consumos para o edifício CP é o do índice PMV, seguido do controlo do índice aPMV, que proporciona um consumo 14% menor que primeiro. O sistema de controlo pela temperatura preferida consegue um valor 39% menor que o do índice PMV.

O sistema de controlo mais eficiente de inverno é novamente o da temperatura preferida (TP), com um consumo 59% inferior ao do controlo pelo índice PMV, enquanto o sistema de controlo pelo índice aPMV apresenta consumos 45% inferiores ao verificado com o sistema de controlo do índice PMV.

Edifício dos Serviços de Ação Social (SAS)

Os consumos de energia térmica do edifício da Edifício da Escola Superior de Educação e Comunicação (ESEC) são apresentados na Tabela 4.7.

Tabela 4.7: Energia térmica diária fornecida pelos sistemas AVAC do edifício SAS [kWh/dia].

SAS	aPMV		PMV		Temperatura preferida	
	Verão	Inverno	Verão	Inverno	Verão	Inverno
Total	-567,9	807,0	-642,9	936,1	-229,5	535,4
Aulas	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Gabinetes	-63,0	99,5	-69,4	115,9	-32,6	87,0

Neste edifício o sistema de controlo da temperatura preferida volta a ser o que propicia consumos mais comedidos, reduzindo-os em 64% no verão e 43% no inverno, em relação ao sistema de controlo do índice PMV. O sistema de controlo do índice aPMV alcança uma redução de 12% no verão e 14% no inverno. Deve-se salientar que este edifício não possui salas de aulas, pelo que os resultados exibidos na Tabela 4.7 para este grupo são todos identicamente nulos.

Análise global de consumos dos sistemas AVAC

A Figura 4.37 apresenta os somatórios dos consumos de energia térmica de todos os edifícios obtidos numericamente para os três sistemas de controlo dos equipamentos de AVAC.

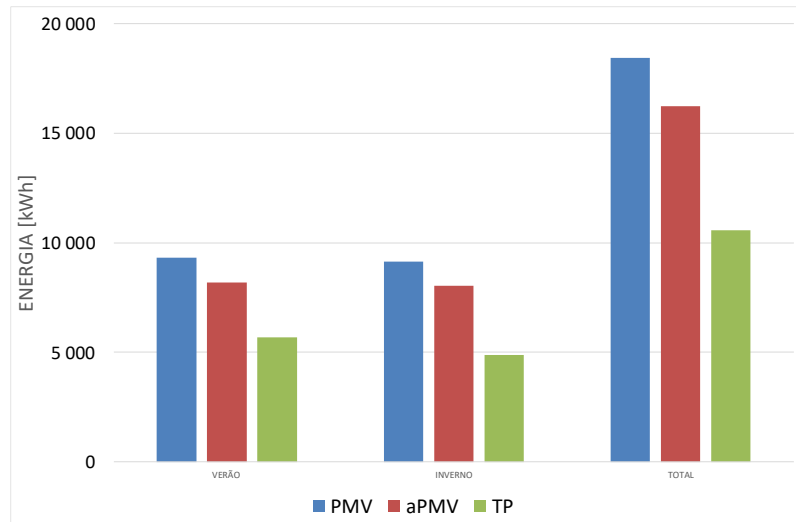


Figura 4.37: Consumos diários de energia térmica dos edifícios fornecida pelos sistemas AVAC, para o dia de verão, o dia de inverno e o somatório dos dois dias simulados, com os três sistemas de controlo analisados.

Os consumos totais são superiores em condições de verão, para todos os sistemas utilizados, o que não é de todo surpreendente, pelas características da zona climática em que se encontram os edifícios estudados.

Em condições de verão, o sistema de controlo pelo índice PMV é aquele que determina consumos diários mais elevados, com 9312 kWh, enquanto os sistemas de controlo do índice aPMV e da temperatura preferida (o mais eficiente) originam consumos de 8202 kWh e 5697 kWh, respetivamente.

No dia típico de inverno os consumos são ligeiramente mais reduzidos, para todos os sistemas. O sistema de controlo do índice PMV consome 9140 kWh, o sistema de controlo do índice aPMV consome 7227 kWh, e o sistema com menores consumos é o TP (temperatura preferida), com apenas 4585 kWh.

O sistema de controlo que leva a um maior consumo global é o do índice PMV, pelo que passou a servir de referência.

Discussão de resultados

No que concerne aos consumos energéticos dos sistemas de AVAC, para a manutenção das condições de conforto térmico nos compartimentos, é possível tirar algumas conclusões:

- Os consumos dos edifícios são um pouco maiores em condições de verão do que em condições de inverno;
- O sistema de controlo pelo índice PMV é, dos três avaliados, o que leva a consumos maiores, tanto no verão como no inverno;
- O sistema de controlo pelo índice aPMV permite reduzir os consumos globais em 16%, tendo consumos mais moderados que o sistema de controlo do índice PMV nas duas estações do ano consideradas.
- O sistema de controlo pela temperatura preferida é o que alcança os melhores resultados, com consumos mais reduzidos, de forma consistente e sempre expressiva. O consumo obtido com este sistema é 44% inferior em relação ao alcançado com o sistema de controlo pelo índice PMV, e 33% inferior ao do sistema de controlo pelo índice aPMV.

4.4.2 Consumos de energia elétrica

Neste ponto é realizada a comparação entre os valores reais de consumos de eletricidade dos edifícios, obtidos a partir do sistema de medições implementado no Campus da Penha, com os consumos obtidos através das simulações efetuadas, tal como explicado em 3.2.5.1 e 3.2.5.2.

As simulações apresentam como valores de saída, entre outros, a potência térmica consumida pelos sistemas de AVAC em cada intervalo de tempo considerado, o que permitiu calcular a energia térmica consumida diariamente (para o dia típico de verão ou de inverno) em cada compartimento de cada edifício sob estudo.

Como não se dispõe de dados reais sobre os consumos dos sistemas AVAC, de forma desagregada, tornou-se necessária a aplicação de fatores que permitissem esta comparação. O procedimento de cálculo dos consumos de energia elétrica foi realizado

dividindo os valores de consumos de energia térmica (simulados) correspondentes pelo COP dos sistemas AVAC. Foi considerado um COP (aquecimento) igual a 4, e uma EER (arrefecimento) igual a 3.

Apresenta-se a seguir o estudo comparativo entre os consumos reais e numéricos dos sistemas AVAC para cada um dos edifícios analisados.

Edifício da Escola Superior de Educação e Comunicação

Os consumos de energia elétrica dos sistemas AVAC nos compartimentos do edifício ESEC é apresentada na Tabela 4.8.

Tabela 4.8: Consumos de eletricidade diários dos sistemas AVAC [kWh/dia], para o edifício da ESEC, com os três sistemas de controlo analisados.

ESEC	Sistemas de controlo dos equipamentos AVAC					
	aPMV		PMV		Temperatura preferida	
	Verão	Inverno	Verão	Inverno	Verão	Inverno
Consumo Total	-432,4	411,4	-482,5	453,8	-297,4	238,3
Salas de Aula	-149,2	105,5	-167,5	117,0	-123,3	51,9
Gabinetes	-59,7	78,0	-64,2	89,6	-21,8	57,3

No cálculo dos consumos foram desagregados os valores para as salas de aulas, gabinetes, laboratórios e salas de informática. Serão apresentados para este e para os restantes edifícios, apenas os consumos de salas de aulas e gabinetes, por serem globalmente os mais significativos. A diferença entre o valor total e a soma dos consumos de gabinetes e salas de aulas corresponde aos consumos dos compartimentos com outras tipologias.

Este edifício apresenta consumos importantes para os gabinetes, mas inferiores aos das salas de aulas, o que resulta de ser um edifício com proporções mais equilibradas entre os números destes tipos de compartimentos.

A Figura 4.38 apresenta uma comparação entre os valores de consumos diários dos sistemas AVAC com os métodos avaliados e os consumos medidos, em condições de verão.

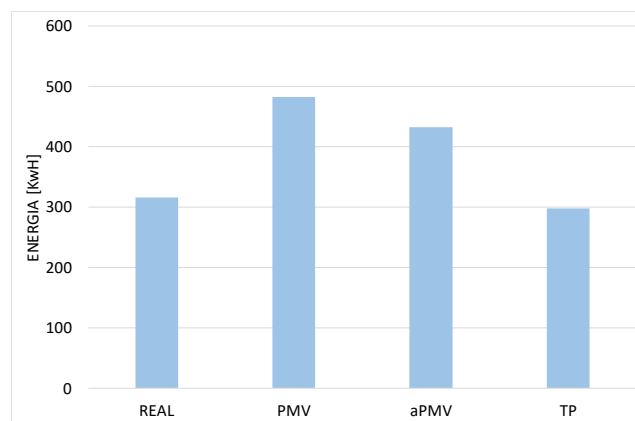


Figura 4.38: Consumos elétricos diários reais e calculados dos sistemas AVAC do edifício da ESEC, de verão.

Verifica-se um afastamento maior entre os valores obtidos com os sistemas de controlo pelos índices aPMV e PMV. O valor que mais se aproxima é o obtido quando se utiliza o controlo pela temperatura preferida.

A Figura 4.39 mostra a comparação entre os valores de consumos diários dos sistemas AVAC com os métodos avaliados e os consumos medidos, para o edifício ESEC, em condições de inverno.

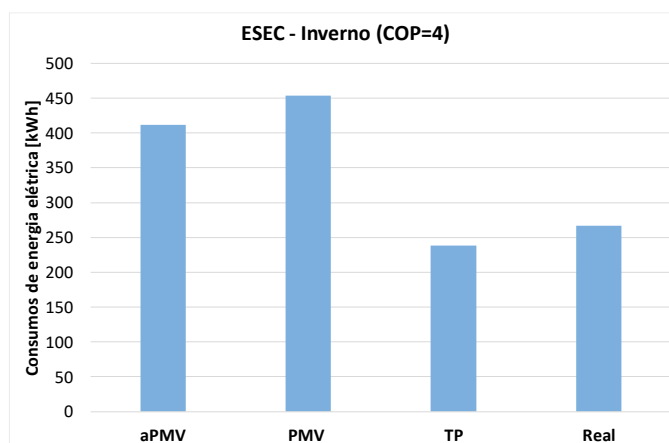


Figura 4.39: Consumos elétricos diários reais e calculados dos sistemas AVAC do edifício da ESEC, no inverno.

Em condições de inverno os valores para sistema de controlo pela temperatura preferida e os reais são próximos, estando o valor simulado 11 % abaixo do medido. Os outros dois sistemas de controlo, ambos apresentam valores superiores ao medido, 54 % maiores no controlo do índice aPMV e 70 % maiores no controlo do índice PMV.

O edifício da Escola Superior de Educação e Comunicação apresenta valores calculados quase sempre superiores aos valores reais de consumo medidos, para a hipótese de os coeficientes de desempenho serem iguais a 4 para o inverno e 3 para o verão. O sistema de controlo pela temperatura preferida é o que obtém resultados mais próximos dos valores resultantes das medições efetuadas.

Para este edifício está patente uma grande vantagem comparativa para o método da temperatura preferida, seguido do sistema de controlo do índice aPMV, e o pior desempenho em termos dos consumos dos três sistemas de controlo é o que utiliza o índice PMV. Este último é o sistema mais exigente em termos das necessidades energéticas para a manutenção do conforto térmico dos utilizadores dos espaços, e o que mais se afasta dos valores de consumos medidos.

Edifício da Escola Superior de Gestão, Hotelaria e Turismo

A Tabela 4.9 apresenta os valores dos consumos de energia elétrica dos sistemas AVAC do edifício ESEC, em condições de verão e condições de inverno.

Tabela 4.9: Consumos elétricos diários dos sistemas AVAC [kWh/dia] para o edifício da ESGHT, com os três sistemas de controlo analisados.

ESGHT	Método de controlo dos sistemas AVAC					
	PMV Adaptativo		PMV Fanger		Temperatura preferida	
	Verão	Inverno	Verão	Inverno	Verão	Inverno
Total	-438,9	379,4	-503,3	443,3	-303,4	242,0
Aulas	-158,5	103,5	-177,8	117,5	-129,0	43,4
Gabinetes	-104,7	110,4	-122,2	128,7	-65,4	83,0

Este edifício apresenta consumos ainda mais relevantes dos gabinetes quando comparados com os das salas de aulas, sendo mesmo superiores, de inverno. Como tem outras tipologias de compartimentos, pode-se observar que os valores totais não correspondem à soma dos consumos dos gabinetes com os consumos das salas.

Na Figura 4.40 compara-se os consumos diários obtidos para os três sistemas de controlo com os consumos reais no edifício ESGHT, em condições de verão.

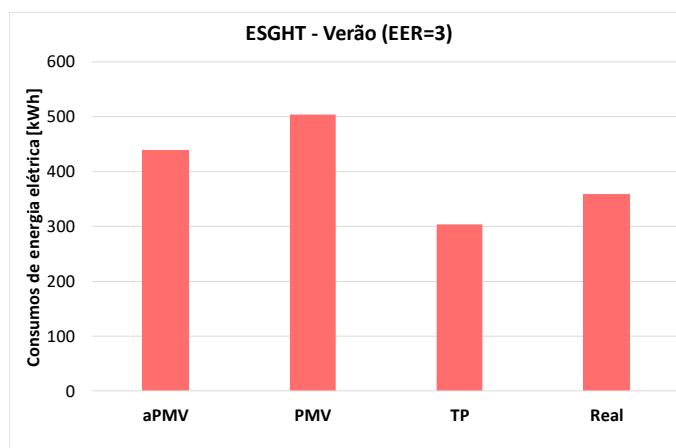


Figura 4.40 – Consumos elétricos diários reais e simulados dos sistemas AVAC do edifício ESGHT, no verão.

Observa-se que o sistema de controlo da temperatura preferida obtém o resultado mais próximo do medido, cerca de 15 % inferior, enquanto os sistemas de controlo pelo índice aPMV e PMV resultam em consumos 23 % e 41 % superiores ao medido, respetivamente.

Na Figura 4.41 compara-se os consumos diários obtidos para os três sistemas de controlo com os consumos reais no edifício ESGHT, em condições de verão.

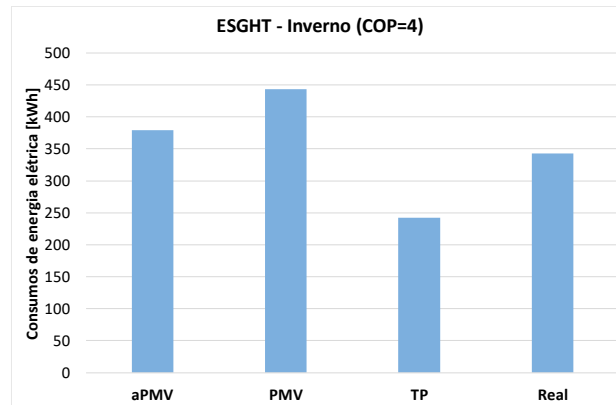


Figura 4.41 – Consumos elétricos diários reais e simulados dos sistemas AVAC do edifício ESGHT, no inverno.

Os menores consumos energéticos são os do controlo pela temperatura preferida, 29 % inferiores aos constatados nas medições. Os consumos obtidos com o sistema de controlo do índice aPMV são 11 % maiores que os reais e o sistema de controlo pelo índice PMV leva a consumos que superam os consumos reais em 29 %.

Pode-se observar uma maior proximidade entre os consumos simulados e os reais em condições de inverno do que em condições de verão.

Edifício nº 1 do Instituto Superior de Engenharia

A Tabela 4.10 apresenta os valores dos consumos de energia elétrica dos sistemas AVAC do edifício ESEC, em condições de verão e condições de inverno, para os diferentes sistemas de controlo estudados.

Tabela 4.10 – Consumos elétricos diários dos sistemas AVAC [kWh/dia] para o edifício nº1 do ISE, com os três sistemas de controlo analisados, para COP igual a 4 e EER igual a 3.

ISE 1	Sistemas de controlo dos equipamentos AVAC					
	aPMV		PMV		Temperatura preferida	
	Verão	Inverno	Verão	Inverno	Verão	Inverno
Consumo Total	-302,3	226,2	-335,0	264,0	-219,3	146,7
Salas de Aula	-138,6	74,3	-152,2	81,0	-120,0	29,2
Gabinetes	-80,7	62,9	-91,5	76,8	-51,0	55,7

Este edifício apresenta consumos ainda mais relevantes dos gabinetes quando comparados com os das salas de aulas, sendo mesmo superiores, de inverno. Como tem outras tipologias de compartimentos, pode-se observar que os valores totais não correspondem à soma dos consumos dos gabinetes com os consumos das salas.

Na Figura 4.42 compara-se os consumos diários obtidos para os três sistemas de controlo com os consumos reais no edifício ISE1, em condições de verão.

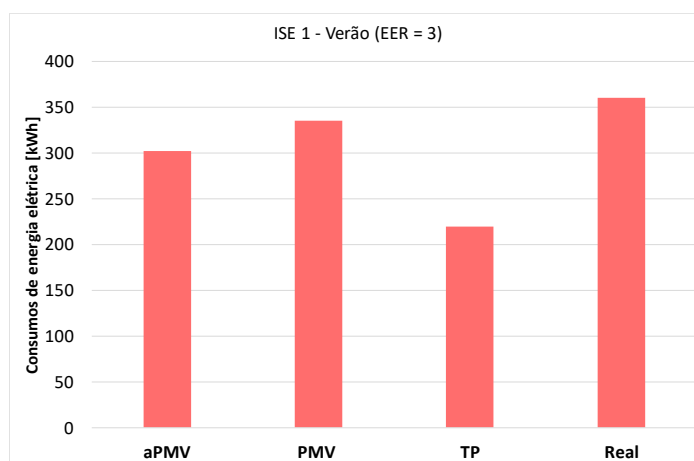


Figura 4.42 - Consumos elétricos diários reais e simulados dos sistemas AVAC do edifício nº 1 do ISE, no verão.

Para o dia típico de verão este edifício apresenta consumos reais superiores a todos os valores simulados. O sistema de controlo do índice PMV tem um consumo 7 % inferior, o sistema de controlo aPMV é 16 % inferior e o da temperatura preferida é 39 % inferior.

Na Figura 4.43 compara-se os consumos diários obtidos para os três sistemas de controlo com os consumos reais no edifício ISE1, em condições de verão.

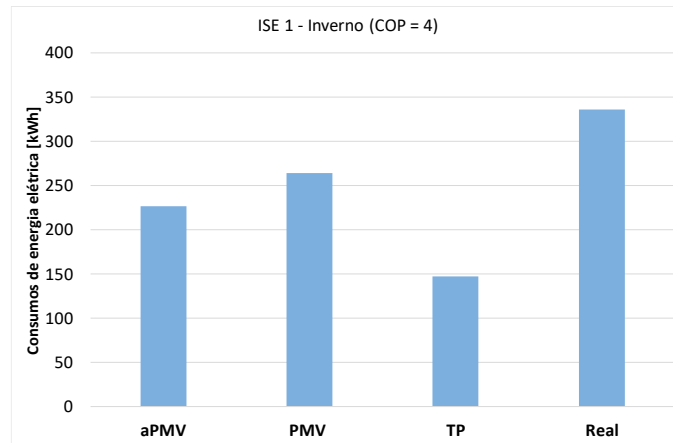


Figura 4.43 - Consumos elétricos diários reais e simulados dos sistemas AVAC do edifício nº 1 do ISE, no inverno.

Para este edifício, o afastamento entre os valores simulados e os reais é maior de inverno do que de verão, com resultados menores que os medidos, 21 % no caso do controlo do índice PMV, 33% no controlo do índice aPMV e 56 % no sistema de controlo pela temperatura preferida, como mostrado na Figura 4.43.

Edifício nº 2 do Instituto Superior de Engenharia

A Tabela 4.9 apresenta os valores dos consumos de energia elétrica dos sistemas AVAC do edifício ISE2, em condições de verão e condições de inverno.

Tabela 4.11 – Consumos elétricos diários dos sistemas AVAC [kWh/dia] para o edifício nº2 do ISE, com os três sistemas de controlo analisados, para COP igual a 4 e EER igual a 3.

	Sistemas de controlo dos equipamentos AVAC					
	aPMV		PMV		Temperatura preferida	
	Verão	Inverno	Verão	Inverno	Verão	Inverno
ISE 2						
Consumo Total	-450,5	281,3	-498,1	323,8	-346,9	136,4
Salas de Aula	-72,9	30,2	-81,1	33,2	-60,4	5,3
Gabinetes	-61,2	83,0	-72,5	108,9	-55,7	82,1

Podem-se observar consumos significativos dos gabinetes, o que é devido ao facto de o seu número ser importante de gabinetes neste edifício. O consumo de inverno nos gabinetes é superior ao das salas de aulas, para os três sistemas de controlo analisados. Em condições de verão ocorre o oposto, com um consumo ligeiramente maior nas salas. Na Figura 4.44 compara-se os consumos diários obtidos para os três sistemas de controlo com os consumos reais no edifício ISE2, em condições de verão.

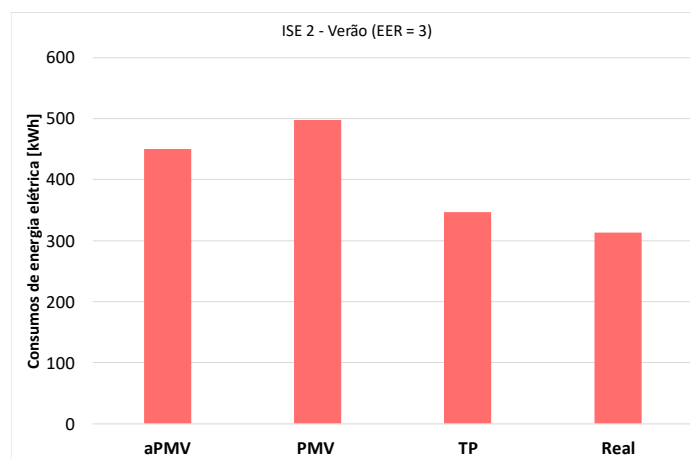


Figura 4.44 - Consumos elétricos diários reais e simulados dos sistemas AVAC do edifício nº 2 do ISE com EER igual a 3, no verão.

Pode-se verificar a proximidade entre os resultados numéricos do sistema de controlo pela temperatura preferida e os valores medidos, e uma diferença um pouco maior para o controlo aPMV; os consumos do sistema de controlo do índice PMV são os mais altos, cerca de 50% maiores que os reais.

Na Figura 4.45 compara-se os consumos reais com os consumos diários obtidos para os três sistemas de controlo no edifício ISE2, em condições de inverno.

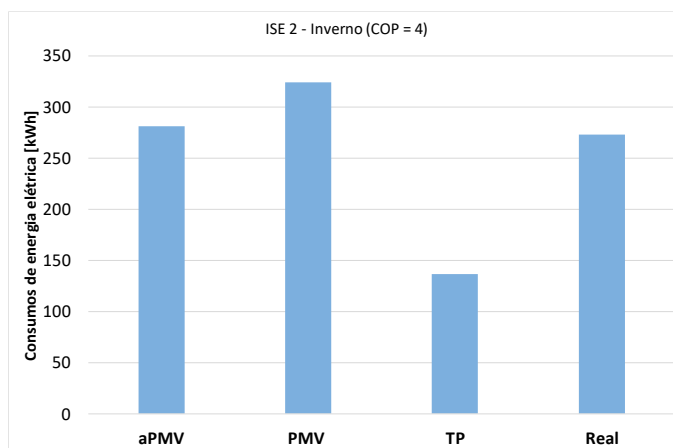


Figura 4.45 - Consumos elétricos diários reais e simulados dos sistemas AVAC do edifício nº 2 do ISE, no inverno.

O sistema de controlo do índice aPMV obtém consumos muito próximos dos valores reais, o sistema de controlo do índice PMV o e o sistema de controlo pela temperatura preferida a obter consumos cerca de 50% mais baixos que o real.

Complexo Pedagógico

Na Tabela 4.12 são apresentados os valores da energia consumida pelos sistemas AVAC do Complexo Pedagógico, para os três sistemas de controlo usados neste estudo.

Tabela 4.12 – Consumos elétricos diários dos sistemas AVAC [kWh/dia] para os edifícios do CP, com os três sistemas de controlo analisados.

CP	Sistemas de controlo dos equipamentos AVAC					
	aPMV		PMV		Temperatura preferida	
	Verão	Inverno	Verão	Inverno	Verão	Inverno
Consumo Total	-920,5	679,0	-1071,0	565,9	-655,6	320,9
Salas de Aula	-411,6	292,8	-471,3	249,8	-332,2	143,9
Gabinetes	-3,8	7,4	-3,9	6,1	0,0	5,4

Ao contrário do edifício ISE2, podem-se observar os reduzidos consumos dos gabinetes, neste caso porque este edifício é constituído quase exclusivamente por salas de aulas.

Na Figura 4.46 compara-se os consumos reais diários com os consumos obtidos para os três sistemas de controlo com no edifício CP, em condições de verão.

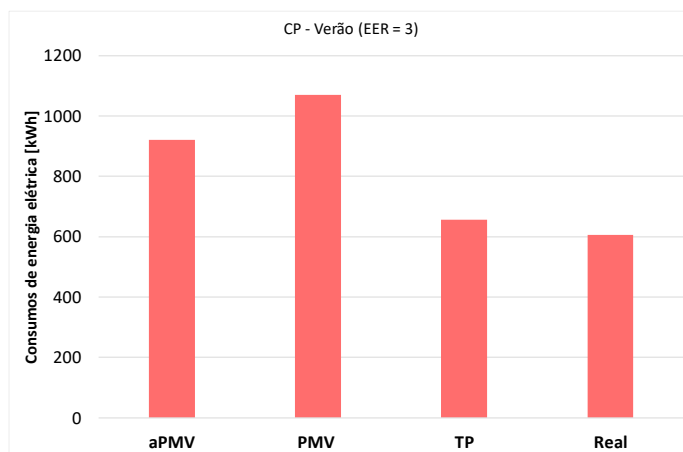


Figura 4.46 - Consumos elétricos diários reais e simulados dos sistemas AVAC do edifício CP, no verão.

Nas condições de verão o sistema de controlo pela temperatura preferida obtém valores muito próximos dos medidos, apenas 7% superiores, enquanto o do índice aPMV e o do índice PMV estão 50 % e 74 % acima do valor registado nas medições, respetivamente.

Na Figura 4.47 compara-se os consumos reais com os consumos diários obtidos para os três sistemas de controlo com no edifício CP, em condições de verão.

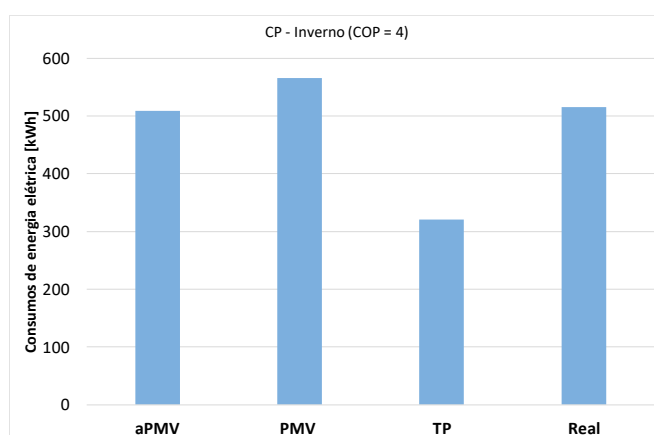


Figura 4.47 - Consumos elétricos diários reais e simulados dos sistemas AVAC do edifício CP, no inverno.

Em condições de inverno, o sistema de controlo aPMV apresenta um resultado quase coincidente com o medido, apenas 1 % inferior. Mais uma vez, o sistema de controlo pelo índice PMV é o que apresenta consumos mais altos, 10 % superiores, enquanto a simulação do sistema de controlo pela temperatura preferida apresenta um valor 38 % inferior.

Edifício dos Serviços de Ação Social

Os resultados dos consumos do edifício dos Serviços de Ação Social (sistemas AVAC) das simulações estão na Tabela 4.13.

Tabela 4.13 – Consumos de eletricidade [kWh] diários dos sistemas AVAC para o edifício do SAS, com os três sistemas de controlo analisados, para COP igual a 4 e EER igual a 3.

SAS	Sistemas de controlo dos equipamentos AVAC					
	aPMV		PMV		Temperatura preferida	
	Verão	Inverno	Verão	Inverno	Verão	Inverno
Consumo Total	-189,3	201,7	-214,3	234,0	-76,5	133,8
Salas de Aula	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Gabinetes	-21,0	24,9	-23,1	29,0	-10,9	21,8

Na Figura 4.48 comparam-se os consumos diários reais com os consumos obtidos para os três sistemas de controlo com no edifício CP, para o dia típico de verão.

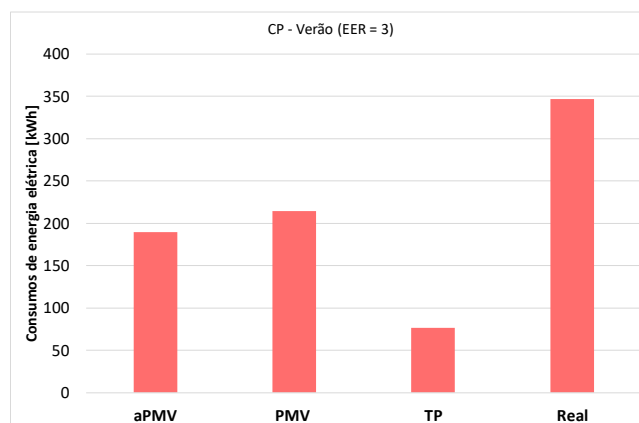


Figura 4.48 – Consumos elétricos diários reais e simulados dos sistemas AVAC do edifício dos SAS, no verão.

Para este edifício, em condições de verão, os consumos do sistema de controlo pela temperatura preferida são os que mais se afastam dos reais, sendo bastante inferiores aos reais, e o sistema de controlo do índice PMV obtém os resultados mais próximos dos medidos. O sistema de controlo do índice aPMV apresenta consumos ligeiramente inferiores aos do controlo do índice PMV, um pouco mais afastados dos consumos reais.

Na Figura 4.49 compara-se os consumos reais com os consumos diários obtidos para os três sistemas de controlo com no edifício CP, para o dia típico de verão.

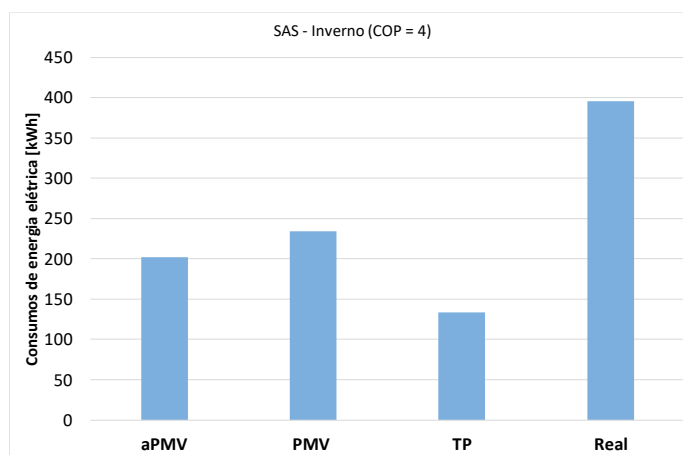


Figura 4.49 – Consumos elétricos diários reais e simulados dos sistemas AVAC do edifício dos SAS, no inverno.

Este edifício destaca-se dos restantes porque os valores medidos são superiores aos simulados, e pelo facto de o sistema de controlo pela temperatura preferida apresentar os valores mais baixos, com uma diferença mais significativa.

Estudo comparativo global de consumos

Apresenta-se a seguir um estudo global que envolve todos os edifícios, e que compara os valores reais e simulados.

Na Figura 4.50 apresenta-se um gráfico que relaciona os consumos de energia elétrica em condições de verão, reais (E_{real}) e simulados (E_{teor}), para os sistemas AVAC.

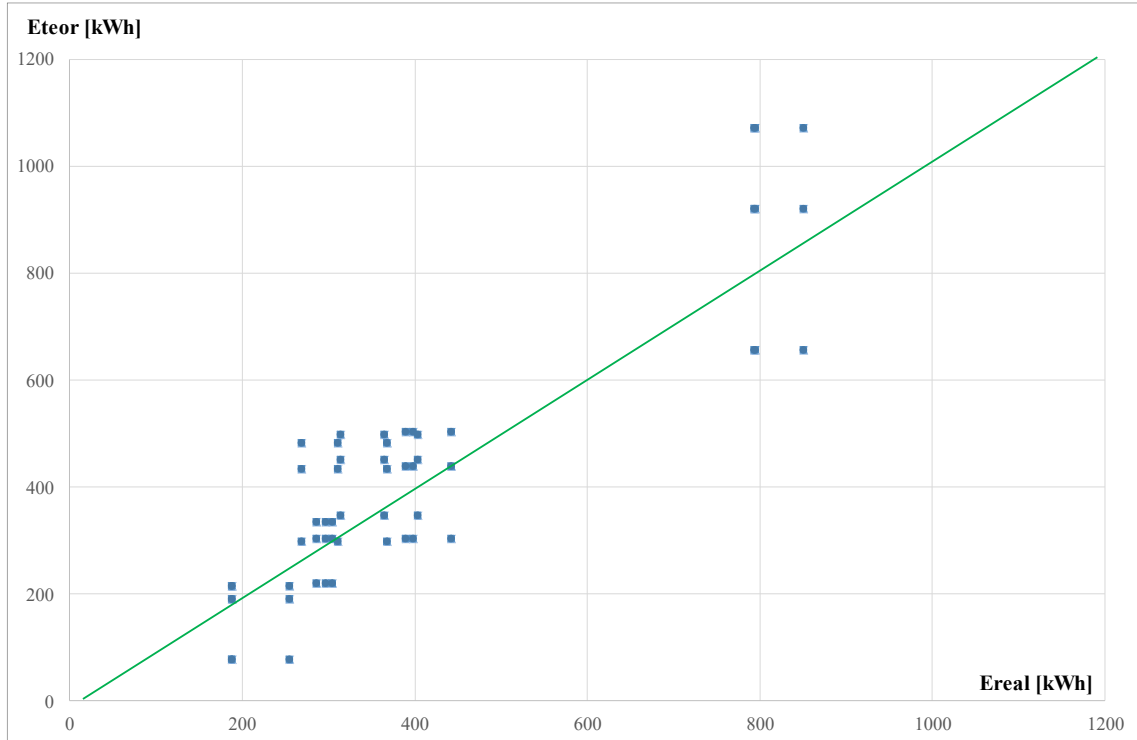


Figura 4.50 – Relação entre os consumos diários de energia elétrica reais e os obtidos por simulação, em condições de verão, considerando todos os edifícios e os três sistemas de controlo utilizados.

Por avaliação visual da Figura 4.50 pode-se concluir que existe uma boa aproximação entre os resultados do consumo de energia elétrica obtidos pelas medições e os resultados obtidos por simulação numérica, em condições de verão.

Procedeu-se a uma análise mais exata destes resultados, considerando os consumos totais diários dos seis edifícios, tendo sido determinados os valores RMS (*root mean square*, expressão inglesa para média quadrática) dos desvios ou diferenças entre os correspondentes valores experimentais e os valores teóricos, para o conjunto dos seis edifícios, para as condições de verão e condições de inverno, e para os três diferentes sistemas de controlo AVAC analisados (PMV, aPMV e TP). A expressão usada foi:

$$d_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum (d_{ESEC}^2) + (d_{ESGHT}^2) + (d_{ISE1}^2) + (d_{ISE2}^2) + (d_{CP}^2) + (d_{SAS}^2)} \quad (74)$$

Onde:

- d é o desvio entre o consumo teórico e o experimental, $d = E_{teor} - E_{real}$, e os índices indicam o nome do edifício a que corresponde o desvio [kWh].

- N é o número total de edifícios. Neste caso: $N = 6$.

Para facilitar a avaliação, os desvios RMS foram divididos pelo valor global de consumo (experimental) dos seis edifícios, de forma a obter o seu valor percentual:

$$d_{RMS}(\%) = 100\% \times d_{RMS}/E_{real_global} \quad (75)$$

Em condições de verão, os valores obtidos para o $d_{RMS}(\%)$ revelam que o sistema de controlo pelo índice aPMV é o que mais se aproxima dos valores medidos, com apenas 7,7% de desvio médio quadrático; o sistema de controlo pela temperatura preferida apresenta um desvio de 10,2% e o sistema de controlo pelo índice PMV obtém 14,6%. Para qualquer dos três sistemas, os resultados são bastante satisfatórios.

Na Figura 4.51 apresenta-se um gráfico que relaciona os consumos de energia elétrica em condições de inverno, reais (E_{real}) e simulados (E_{teor}), para os sistemas AVAC.

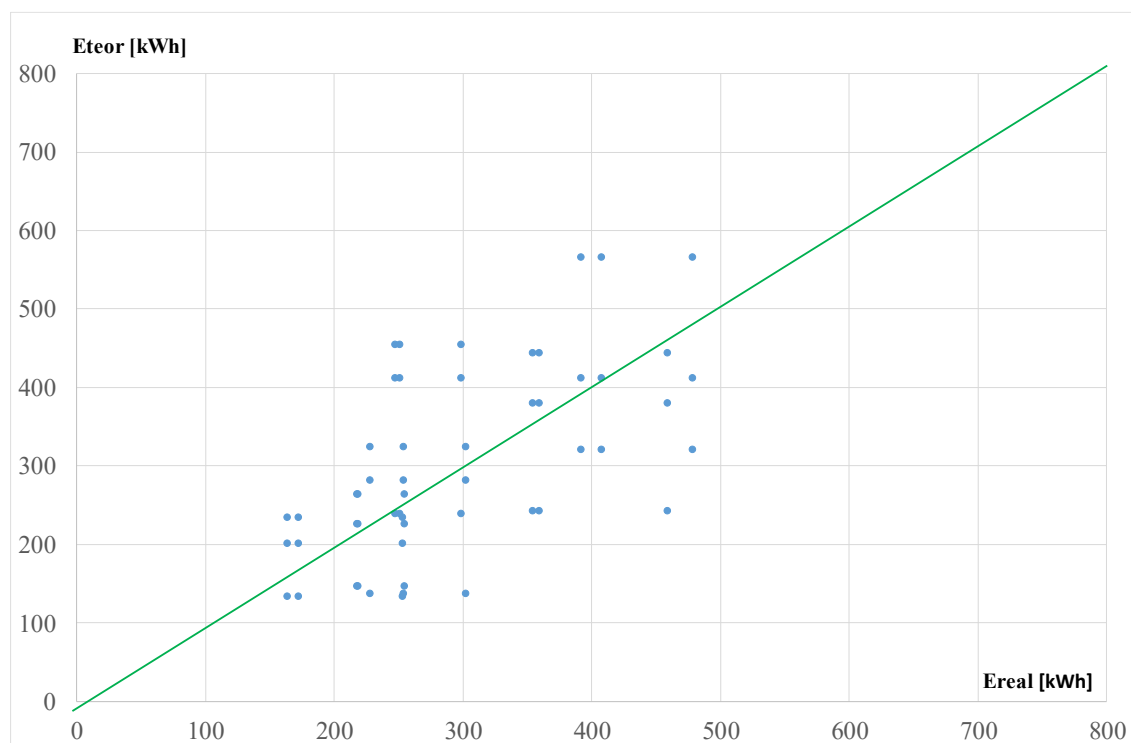


Figura 4.51 – Relação entre os consumos diários de energia elétrica real e obtidos por simulação numérica, em condições de inverno, para todos os edifícios e os três sistemas de controlo utilizados.

Em condições de inverno, foi realizado o cálculo dos desvios entre os valores teóricos e os experimentais, com idêntico procedimento ao adotado para o dia de verão, e verificou-se que o sistema aPMV voltou a apresentar o menor desvio RMS das três metodologias de controlo analisadas, com $d_{RMS}(\%)$ de 8,4%, o sistema TP apresentou 13,9% e o sistema PMV 14,3%. São bons resultados, que demonstram a proximidade entre os valores dos consumos medidos e os experimentais, tanto de verão como de inverno, um pouco melhor, de verão, para os sistemas aPMV e TP, e ligeiramente melhor, de inverno, para o sistema PMV.

Em seguida, com o intuito de analisar a eficácia das três metodologias de controlo dos sistemas AVAC na eliminação das condições de desconforto térmico, foram determinados os rácios entre as reduções nas horas de desconforto térmico obtidas por cada sistema (diferença entre as horas de desconforto térmico com o sistema AVAC desligado e as correspondentes com os sistemas PMV, aPMV e TP) e os respetivos valores dos consumos numéricos obtidos para cada um dos três sistemas de controlo, em h/kWh.

Em condições de verão, o sistema mais eficiente é o TP, que evita 5,28 horas de desconforto térmico por cada kWh consumido, seguido do sistema aPMV com 4,74 h/kWh. O sistema menos eficaz é o PMV, com 3,23 h/kWh. De inverno, é o sistema aPMV o mais eficaz, eliminando 5,59 horas de desconforto térmico por kWh consumido, seguido do sistema TP, com 4,51 h/kWh, e o menos eficaz é o sistema PMV, com 3,27 h/kWh. Considerando a média para os dois dias (de inverno e de verão) simulados, o melhor resultado é o obtido pelo sistema de controlo pelo índice aPMV, com 5,17 h/kWh, o segundo melhor é o TP, com 4,90 h/kWh, e o sistema de controlo pelo índice PMV só obtém uma redução de 3,25 h/kWh.

Discussão de resultados

Os resultados do estudo dos consumos de energia elétrica dos sistemas AVAC mostram que:

- Para todos os edifícios, o menor consumo de energia elétrica é obtido quando se utiliza o sistema de controlo pela temperatura preferida (TP);

- Em condições de Verão, os consumos reais aproximam-se dos consumos do sistema de controlo por TP nos edifícios ESEC e ISE2, do sistema de controlo aPMV nos edifícios ESGHT, ISE1 e CP, e do sistema de controlo PMV no edifício SAS; em condições de Inverno, os consumos reais são mais próximos dos consumos do sistema de controlo aPMV em todos os edifícios, exceto no edifício ESEC, onde os consumos reais se aproximam dos consumos do sistema de controlo pela temperatura preferida.

Globalmente, em termos comparativos entre os três diferentes métodos estudados, manifesta-se uma tendência muito consistente em praticamente todas as simulações:

- O sistema de controlo do equipamento AVAC pelo índice PMV, que procura restringir as condições de conforto térmico dos compartimentos à Categoria C da norma ISO 7730 (2005) ou a da ASHRAE 55 (2017), é o que apresenta os resultados mais elevados em termos dos consumos, por se tratar de condições mais restritivas e exigentes do que os restantes sistemas. O sistema de controlo pelo índice aPMV, ao assumir que os ocupantes dos espaços têm alguma capacidade de se adaptar às condições ambientais, dependendo da época do ano e de outros fatores, acaba por apresentar valores de consumos mais baixos do que o sistema de controlo pelo índice PMV. O controlo aPMV é o que melhor reflete os valores de consumo verificados nas medições para as condições de inverno.
- Dos três sistemas simulados, o que resultou nos mais baixos consumos foi o sistema de controlo TP (temperatura preferida). É o sistema de controlo que pode gerar maiores reduções nas necessidades energéticas dos edifícios. Os resultados obtidos no dia típico de verão tendem a subestimar as necessidades de aquecimento, o que fica patente no número maior de horas de desconforto térmico nestas condições.
- O edifício SAS é aquele onde os valores reais de consumos mais se afastam dos valores simulados. Representa um caso especial no conjunto dos edifícios estudados por ser um edifício onde não existe a tipologia de sala de aula nem laboratório, incluindo muitos gabinetes, secretarias e a cantina. Recentemente,

teve um acréscimo de um centro de cópias na parte exterior do edifício que é alimentada a partir do quadro elétrico geral do edifício. Este novo compartimento do edifício não foi considerado neste trabalho, simplesmente porque não existia quando foram desenvolvidos os ficheiros utilizados nas simulações. Consequentemente, os consumos devidos ao centro de cópias não foram considerados na simulação, o que sem dúvida contribuiu de forma significativa para os consumos reais serem mais elevados que os simulados. Não se dispõe de informação específica a respeito da dimensão deste consumo, mas a sala dispõe de várias impressoras e fotocopiadoras que trabalham quase ininterruptamente, diversos computadores e sistema AVAC.

A comparação realizada entre os consumos calculados com o programa de simulação dinâmica e os valores reais, medidos pelo sistema integrado de medição de consumos, permite considerar que os valores obtidos nas simulações são credíveis, dentro das limitações do estudo, que decorrem do facto de que o atual sistema integrado de medições só mede e regista os valores da potência ativa total de cada edifício, não permitindo saber diretamente os valores reais dos consumos dos sistemas AVAC. Em estudos futuros deverá ser implementada a medição desagregada para os sistemas AVAC, para permitir aperfeiçoar os modelos utilizados neste trabalho.

4.4.3 Consumos e radiação solar

São comparados neste ponto os resultados obtidos para os valores da radiação solar incidente nas janelas dos edifícios e os seus respetivos consumos energéticos.

Análise e discussão de resultados

Na Figura 4.52 é apresentado um gráfico que mostra a correlação entre os valores da radiação solar e dos consumos dos edifícios, em condições de verão, para os edifícios analisados, e na Figura 4.53 a mesma correlação, em condições de inverno.

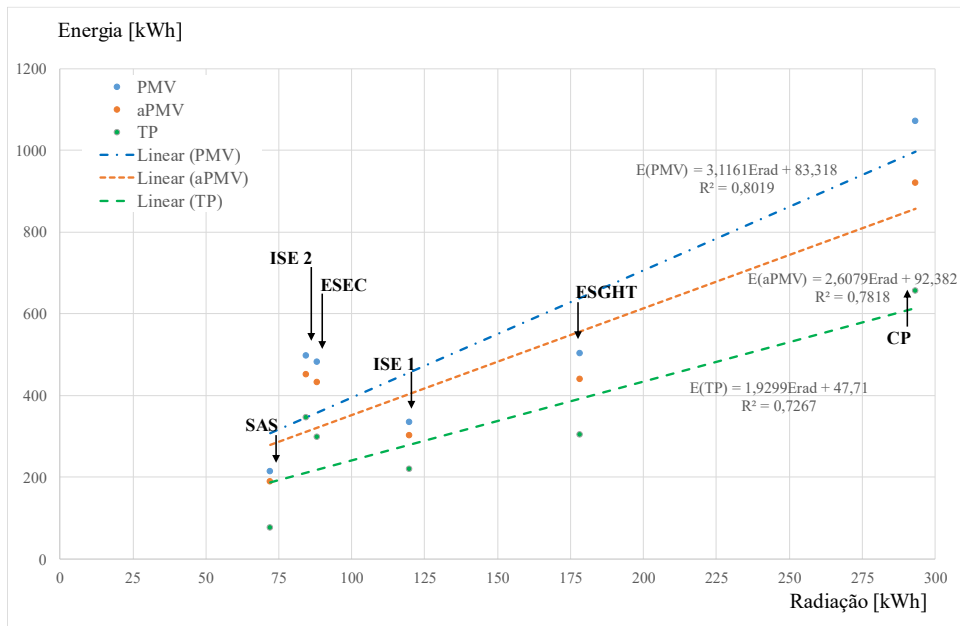


Figura 4.52 – Relação entre a radiação solar diária incidente nas janelas e o consumo de energia diário obtido por simulação numérica, em condições de verão, considerando todos os edifícios e os três tipos de sistema de controle utilizados.

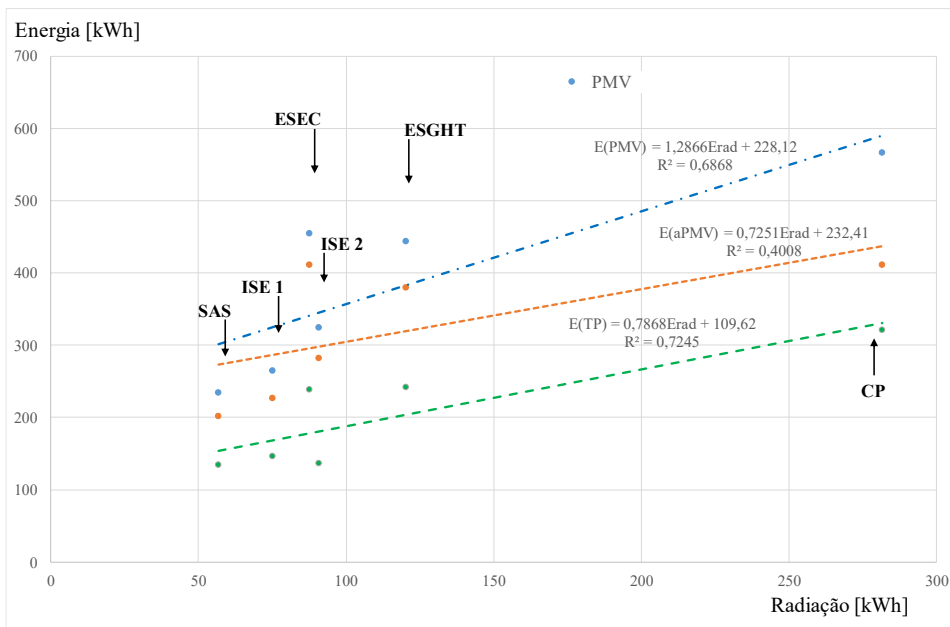


Figura 4.53 – Relação entre a radiação solar diária incidente nas janelas e o consumo de energia diário obtidos por simulação numérica, em condições de inverno, considerando todos os edifícios e os três tipos de sistema de controle utilizados.

Pode-se concluir que:

- O edifício que recebe menos energia da radiação solar incidente nas janelas é o SAS, e o que recebe mais é o CP. Qualquer que seja o tipo de sistema de controlo utilizado, verifica-se que o edifício que consome menos energia elétrica é o SAS e o que consome mais é o CP, o que ocorre devido à sua arquitetura, orientação e grande superfície envidraçada. O edifício SAS tem vários pisos e uma planta quase quadrada, pelo que há muitos compartimentos que recebem pouca radiação solar.
- Pode-se retirar uma relação linear entre o consumo de energia e a radiação, de acordo com o tipo de sistema de controlo utilizado;
- O efeito da radiação no consumo de energia é mais acentuado no caso em que se utiliza o sistema de controlo do índice PMV, e menor no caso onde se utiliza o sistema de controlo TP (temperatura preferida).

4.5 Produção de energia elétrica com sistemas fotovoltaicos

Neste ponto serão apresentados os resultados dos cálculos relativos à produção de energia elétrica a partir de instalações fotovoltaicas, montadas nas coberturas dos edifícios. O procedimento foi explicado no ponto 3.2.6.

Um dos objetivos deste estudo foi avaliar qual a fração dos consumos que poderia ser coberta pela energia produzida. Com este propósito, a energia produzida foi comparada com o consumo total do edifício e também com o consumo elétrico devido ao sistema de AVAC, consumos esses determinados a partir dos valores experimentais obtidos pelo sistema integrado de medição de consumos implementado no Campus, descrito em 3.2.5.2.

As áreas são determinadas em função das superfícies das coberturas dos edifícios, mas deve ser feita uma ressalva, indicando que as áreas eventualmente definidas por um projeto a desenvolver para uma instalação fotovoltaica teriam que envolver um estudo mais pormenorizado das coberturas. As áreas úteis seriam efetivamente inferiores, para

acomodar espaços já ocupados, por exemplo, por equipamentos AVAC, ou outros obstáculos não definidos nos modelos 3D dos edifícios. Estas situações não foram consideradas no âmbito deste trabalho.

Áreas disponíveis e energia produtível

Foram calculadas as áreas totais dos módulos fotovoltaicos a instalar unicamente nas coberturas dos edifícios. Foram utilizadas todas as coberturas, o que significa que a área disponível para utilização com esta finalidade em projetos reais é inferior, devido à presença de obstáculos, como os equipamentos dos sistemas AVAC, e outras irregularidades das referidas coberturas.

No âmbito deste trabalho, não seria possível realizar projetos detalhados para cada edifício, já que o objetivo era estudar várias outras opções.

Além das áreas, foram também estimados os valores da energia elétrica produtível com os sistemas fotovoltaicos para o dia típico de verão e para o dia típico de inverno, a partir dos valores de irradiância solar e de temperatura do ar exterior, como explicado no ponto 2.10.

Os valores das áreas e energia produzida calculadas são apresentados na Tabela 4.14.

Tabela 4.14: Áreas disponíveis para os sistemas fotovoltaicos e energia produtível diária, em condições de verão e de inverno, para os edifícios analisados.

Edifícios	Área [m ²]	Energia [kWh/dia]	
		no Verão	no Inverno
ESEC	1520	1165	653
ESGHT	1270	973	546
ISE 1	595	456	256
ISE 2	1920	1472	825
CP	1127	864	484
SAS	407	312	175
Todos	6839	5242	2938

Note-se que o edifício com a maior área disponível é o edifício nº2 do Instituto Superior de Engenharia (ISE 2), com 1.920 m², e o edifício com menor área disponível é o dos Serviços de Ação Social (SAS), com 407 m².

Produção fotovoltaica e consumos dos sistemas AVAC

Foi efetuada uma comparação entre a energia produzida pelos sistemas fotovoltaicos e os valores obtidos para a energia elétrica consumida pelos sistemas AVAC pelas simulações numéricas, em todos os edifícios.

Na Figura 4.54 é apresentada uma comparação entre os valores dos consumos diários dos sistemas AVAC e a produção de energia solar fotovoltaica, em condições de verão.

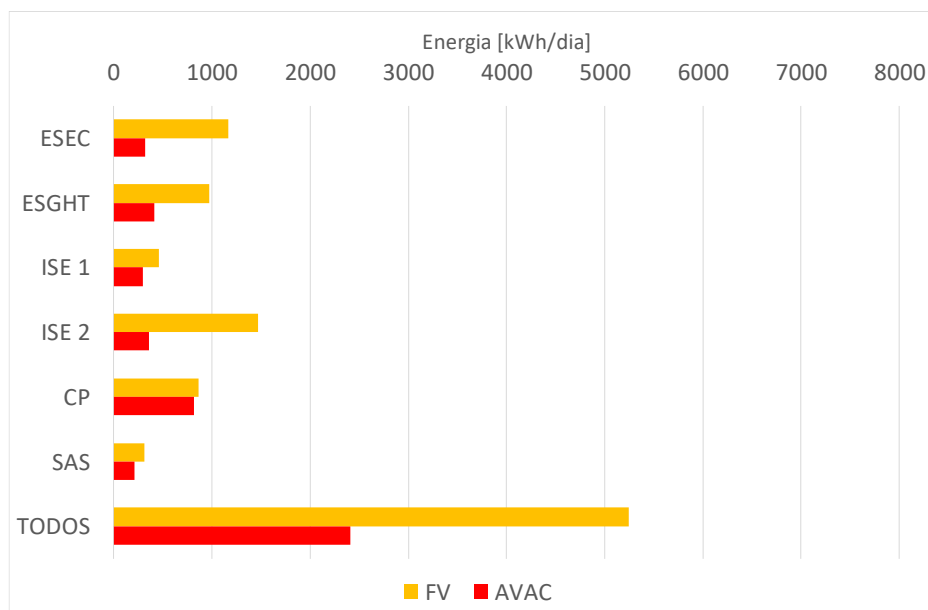


Figura 4.54 – Produção diária de energia elétrica dos sistemas fotovoltaicos (FV) e consumos diários AVAC dos edifícios (AVAC), em condições de verão.

A instalação solar fotovoltaica desenhada fornece mais energia elétrica do que a consumida pelos sistemas AVAC, para todos os edifícios, em condições de verão, sendo cerca de 2 vezes o valor necessário para todos os edifícios.

No entanto deve-se ter em conta que a energia produzida depende da radiação solar incidente nos painéis, pelo que há períodos em que a produção é inferior ao consumo,

e no período noturno não há produção de energia, pelo que não é possível garantir autonomia com esta fonte de energia. Só com a instalação de um sistema de acumulação de energia, com bancos de baterias ou outros equipamentos, é possível assegurar a autonomia dos edifícios com um sistema fotovoltaico.

O edifício em que a energia consumida mais se aproxima do valor produtivo com os sistemas fotovoltaicos é o CP, e o que produz mais energia em relação ao seu consumo é o ISE2.

A mesma comparação é apresentada, para as condições de inverno, na Figura 4.55.

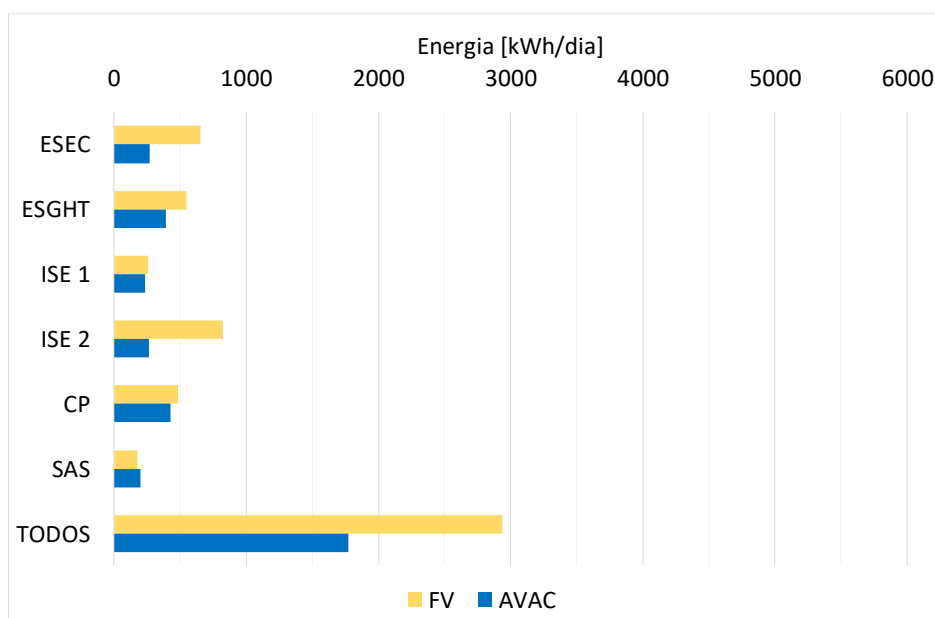


Figura 4.55 - Produção diária de energia elétrica dos sistemas fotovoltaicos (FV) e consumos diários AVAC dos edifícios (AVAC), em condições de inverno.

Verifica-se que os sistemas fotovoltaicos seriam capazes de produzir mais energia do que a necessária para os consumos dos sistemas AVAC. O ISE2 é o edifício que tem o maior rácio de produção de energia pelo consumo, e o de menor rácio é o edifício SAS.

Produção fotovoltaica e consumos totais dos edifícios

Também foram comparados os consumos reais totais de energia elétrica de todos os edifícios com a produção fotovoltaica, para o dia típico de verão, para o dia típico de inverno e para a soma dos valores dos dois dias referidos, obtendo-se os resultados mostrados na Figura 4.56.

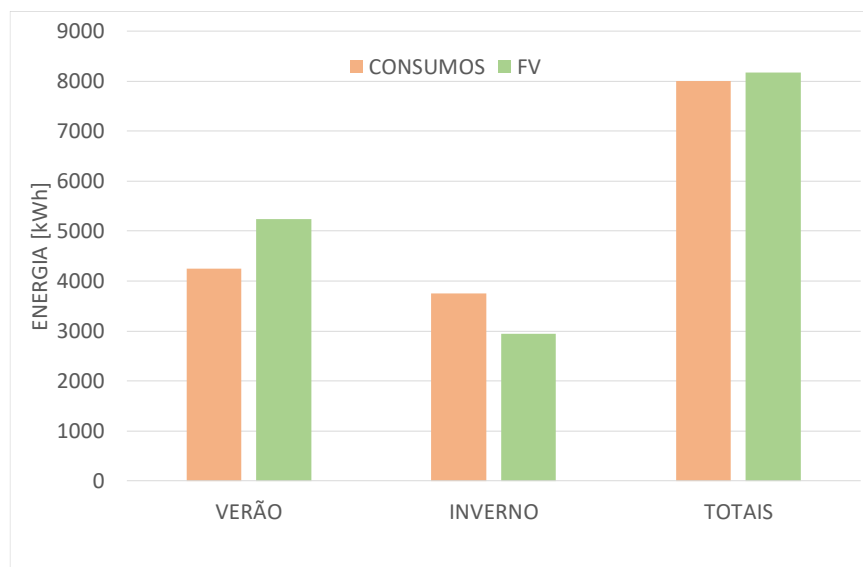


Figura 4.56 - Comparação entre a produção de energia solar fotovoltaica e os consumos elétricos reais dos edifícios.

Verifica-se que a produção de energia solar fotovoltaica supera o consumo em condições de verão, mas é insuficiente em condições de inverno. Isto ocorre porque a produção fotovoltaica é dependente do valor da radiação solar disponível, que é mais reduzida no inverno. Para o somatório dos valores do dia de verão com o dia de inverno, a produção é praticamente igual ao consumo total de energia dos edifícios.

Deve-se notar que isto não significa que fosse possível desligar a instalação da rede, porque o sistema fotovoltaico não pode cobrir as necessidades energéticas durante a noite, ou em períodos de menor irradiância. Para esse fim, seria necessária a implementação de um sistema de apoio com acumulação de energia com baterias, por exemplo.

Além disso, a área que foi determinada é superior à que é possível utilizar, em termos práticos de projeto, já que não foram tidos em conta os equipamentos AVAC e outros obstáculos existentes nas coberturas reais dos edifícios. Ainda assim, é possível verificar que a opção pela energia solar fotovoltaica pode reduzir significativamente a necessidade de compra de energia à rede elétrica, por consequência reduzindo a pegada ecológica dos edifícios, objetivo fundamental deste trabalho. O autoconsumo com venda à rede da eletricidade produzida à rede elétrica poderá ser uma boa opção, para aproveitar os períodos em que a produção é superior ao consumo, obtendo alguma retribuição financeira.

5 Conclusões

O presente trabalho, de carácter numérico, avalia várias possíveis soluções técnicas que visam reduzir as emissões de um conjunto de seis edifícios da Universidade do Algarve, no Campus da Penha, garantindo as condições de conforto térmico dos ocupantes. O objetivo é aproximar estes edifícios do conceito de “Net Zero Building”, através da estratégia combinada de redução dos consumos energéticos e da produção de energia renovável localmente

O programa utilizado neste estudo simula a resposta térmica dinâmica de edifícios com topologia complexa. Permitiu avaliar o conforto térmico dos ocupantes, a qualidade do ar interior dos compartimentos e os consumos energéticos associados a cada tipo de sistema de climatização. Também foi estimada a produção de energia elétrica baseada em sistemas fotovoltaicos.

Foram avaliados três diferentes sistemas de controlo dos equipamentos AVAC, e três sistemas baseados em superfícies radiantes, dois deles associados a bombas de calor geotérmicas e outro associado a coletores solares térmicos. As simulações numéricas foram realizadas para os seis edifícios, em condições de inverno e de verão, para obter as condições de conforto térmico e qualidade do ar interior dos edifícios com os sistemas acima descritos.

Uma simulação foi efetuada com os sistemas AVAC desligados com o objetivo de obter a resposta térmica passiva dos edifícios analisados, que foi utilizada como referência para as condições de conforto térmico e de qualidade do ar interior para as restantes simulações. Os sistemas de controlo dos equipamentos AVAC analisados foram: pelo

índice PMV, pelo índice aPMV e pela temperatura preferida dos ocupantes. Nos sistemas baseados em superfícies radiantes alimentadas com bombas de calor geotérmicas foram analisadas duas possibilidades: uma em que todas as superfícies dos compartimentos são radiantes, incluindo tetos, pavimentos e paredes, e outra em que apenas os tetos e pavimentos são radiantes. Ambas as situações apenas consideram as condições de verão, para a função de arrefecimento. Para os sistemas baseados em superfícies radiantes alimentadas com coletores solares térmicos foi realizada uma única simulação, em condições de inverno, para a função de aquecimento, utilizando apenas os tetos e pavimentos como superfícies radiantes.

Na análise efetuada à qualidade do ar interior foram utilizados caudais de ventilação que se revelaram suficientes para assegurar a qualidade do ar interior nos espaços ocupados em todos os casos estudados. A concentração de CO₂ nos compartimentos é sempre inferior ao limiar regulamentar de 2250 mg/m³ (RECS, 2013). Por este motivo, o somatório das horas de desconforto por qualidade do ar interior deu resultado nulo.

Na análise às condições de conforto térmico proporcionadas aos ocupantes dos compartimentos apresentam-se evolução do índice PMV e as horas de desconforto térmico por frio e por calor.

A simulação com os sistemas desligados mostrou que a resposta térmica passiva dos edifícios não é capaz de manter condições de conforto térmico aceitáveis, nem de verão nem de inverno, confirmando a necessidade de utilização os sistemas AVAC para a manutenção de condições de conforto térmico adequadas.

Dos três diferentes sistemas de controlo o mais eficaz a reduzir as horas de desconforto térmico é o sistema AVAC controlado pelo índice aPMV, tanto de inverno como de verão, sendo eficaz em todos os edifícios e salas. Elimina quase 100% do total de horas de desconforto térmico. O sistema de controlo pelo índice PMV é bastante eficaz, reduzindo 71% das horas de desconforto térmico, e o menos eficaz é o sistema de controlo pela temperatura preferida, que reduz 63% das horas de desconforto térmico. Este último assegura condições de conforto térmico aceitáveis em boa parte do tempo, mas não evita, tanto em condições de verão como de inverno, a ocorrência de algumas situações de desconforto moderado.

Os dois sistemas radiantes com bombas de calor geotérmicas foram bastante eficazes a reduzir o desconforto térmico dos ocupantes por calor, em condições de verão. A utilização das superfícies horizontais apresenta melhores resultados para a maior parte dos edifícios, porque é igualmente eficaz a reduzir as horas de desconforto térmico por calor, e não arrefece excessivamente os espaços. Com todas as superfícies o sistema chega a causar desconforto térmico por frio no verão, em salas com menos ocupação ou que recebem menor nível de radiação solar. Devido à sua dimensão, este sistema seria muito dispendioso, e necessitaria de caudais muito elevados de água para o seu funcionamento. Uma possível solução seria utilizar unicamente os tetos dos compartimentos como superfícies radiantes, opção mais eficiente para o arrefecimento.

O sistema de superfícies radiantes associadas a coletores solares térmicos consegue reduzir as horas de desconforto térmico por frio em 42%. Não é suficientemente eficaz para assegurar condições de conforto térmico aceitáveis em todos os espaços, conseguindo bons resultados durante a tarde. A redução do número de salas a aquecer, ou a utilização apenas dos pavimentos radiantes, mais eficazes na função de aquecimento do que os tetos, poderia ser uma boa opção.

Dos edifícios analisados, o menos desconfortável termicamente é o da ESGHT, e o que apresenta menos horas de desconforto térmico é o SAS. Se considerarmos o desconforto por unidade de área do edifício, o edifício nº2 do ISE é o mais desconfortável, e o Complexo Pedagógico é o menos desconfortável.

Em termos dos consumos de energia térmica dos equipamentos AVAC verificou-se que o sistema de controlo pelo índice PMV é o que causa maiores consumos, em todas as situações, e o sistema de controlo da temperatura preferida é o mais eficiente, com consumos 44% menores que sistema de controlo do índice PMV, mas permite que ocorram algumas situações de desconforto térmico. O sistema de controlo do índice aPMV consome menos do que o controlo do índice PMV, e é o mais eficiente a garantir as condições de conforto térmico aos ocupantes dos edifícios, mantendo os consumos reduzidos, com um melhor compromisso entre conforto e consumo que o sistema de controlo pela temperatura preferida.

Conclusões

A partir dos resultados obtidos para os consumos de energia térmica, foram determinados os valores de consumos elétricos dos sistemas AVAC com valores atribuídos ao COP ou EER destes equipamentos. Estes resultados foram comparados com valores reais de consumos dos sistemas AVAC medidos pelo sistema integrado de medição implementado no Campus da Penha.

Considerando o COP dos sistemas AVAC igual a 4 e a EER igual a 3, o consumo elétrico calculado para o sistema de controlo do índice aPMV é o que mais se aproxima dos valores reais de consumo, na maior parte dos casos. De forma global, os valores calculados estão com boa ou razoável aproximação aos experimentais, com a exceção do edifício dos Serviços de Ação Social, devido às alterações do perfil de consumo recentes que sofreu.

Foram determinadas as áreas disponíveis para a instalação dos painéis solares e estimada a energia elétrica produtível por sistemas fotovoltaicos. A produção estimada por edifício é superior aos consumos dos sistemas AVAC em todos os edifícios, de verão, e em todos exceto o SAS, de inverno. A produção total é maior que o consumo total, de verão, e inferior, de inverno; a energia total produzida para os dois dias analisados é idêntica ao consumo total real dos edifícios. A opção pelo autoconsumo com venda à rede é uma hipótese a ser considerada, porque permite compensar a energia consumida em alguns períodos de menor produção com a injeção de energia nos períodos em que a produção supera o consumo.

Com base nestes resultados, pode-se afirmar que há uma disponibilidade de áreas para a produção de energia solar fotovoltaica, térmica, ou ambas, de modo a reduzir significativamente a energia fornecida pela rede elétrica, aportando benefícios económicos e ambientais.

O aproveitamento solar térmico não se revelou completamente eficaz a proporcionar conforto aos ocupantes e não pode ser instalado simultaneamente com os sistemas fotovoltaicos, ou as áreas teriam de ser repartidas.

A instalação dos sistemas de bombas de calor geotérmicas a alimentar superfícies radiantes, em especial o que usa apenas tetos e pavimentos, pela sua maior viabilidade

económica (menos superfícies), pode ser combinada com o aproveitamento fotovoltaico e potenciar um ainda melhor balanço energético com a rede.

6 Futuros desenvolvimentos

Este trabalho pretende ser o trampolim para os próximos desenvolvimentos, em que se pretende aprimorar as soluções agora apresentadas, baseadas em energias renováveis, criando ferramentas de análise cada vez mais elaboradas com este objetivo em vista.

No caso dos sistemas baseados em superfícies radiantes estudados, outras soluções podem ser estudadas, nomeadamente usando só os tetos para a função de arrefecimento e só os pisos para a função de aquecimento. Alternativamente a solução poderá passar por usar este tipo de sistema apenas para alguns compartimentos mais desconfortáveis.

O estudo do aproveitamento do recurso solar pode ser aprimorado, definindo áreas para o solar térmico e para o solar fotovoltaico, de acordo com as características dos edifícios.

A energia eólica é atualmente um recurso fundamental no sistema elétrico português, representando uma importante parcela da produção elétrica nacional. Pretende-se realizar estudos para a implementação da produção eólica como outra solução possível para a redução das emissões dos edifícios, hipótese que não foi contemplada neste estudo.

O estudo do desconforto local não foi realizado neste trabalho. Os resultados obtidos podem ser usados num trabalho mais minucioso sobre o desconforto local nas salas mais desconfortáveis.

Um aspeto importante da aplicação das energias renováveis ou das medidas de eficiência energética é a sua avaliação económica. Pretende-se estudar a viabilidade económica de algumas das soluções apresentadas neste trabalho, para que possa concretizar-se o seu potencial benefício económico e ambiental.

Referências bibliográficas

- Abrantes P. (2011). Estudo térmico de um edifício escolar com topologia complexa. Tese de mestrado em Engenharia do Ambiente, Universidade do Algarve, Faro.
- ASBEC (2011). Zero Emissions Residential: Defining Zero Emissions Buildings – Review and Recommendations Report, *Australian Sustainable Built Environment Council*, 2011, www.asbec.asn.au/publications.
- ALTENER (2004). *Energia Fotovoltaica - Manual Sobre Tecnologias, Projeto e Instalação*, (IST, DGS), adaptado de original alemão.
- Ascione *et al.* (2016). F. Ascione, N. Bianco, O. Böttcher, R. Kaltenbrunner, G. P. Vanoli, Net zero-energy buildings in Germany: Design, model calibration and lessons learned from a case study in Berlin, *Energy and Buildings* 133 (2016) 688–710.
- ASHRAE Standard 55 (2017). Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. *American Society of Heating Refrigeration and Air Conditioning Engineers*. Atlanta, USA.
- ASHRAE (2010b). ANSI/ASHRAE Standard 62.1-2010, Ventilation for acceptable indoor air quality. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. Atlanta, USA. 2010.
- ASHRAE (2014a) - ANSI/ASHRAE Standard 105-2014, “Standard Methods of Determining, Expressing, and Comparing Building Energy Performance and Greenhouse Gas Emissions”.
- ASHRAE (2014b) - ANSI/ASHRAE/USGBC/IES Standard 189.1-2014, “Standard for the Design of High-Performance Green Buildings Except Low-Rise Residential Buildings” *Alternate compliance path to 2015 International Green Construction Code (IgCC).
- ASHRAE (2015) - ANSI/ASHRAE/IES Standard 100-2015, “Energy Efficiency in Existing Buildings”.
- ASHRAE (2016a) - ANSI/ASHRAE Standard 62.1-2016, “Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality”.
- ASHRAE (2016b) - ANSI/ASHRAE Standard 90.1-2016, “Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings”.
- Berggren *et al.* (2013). B. Berggren, M. Hall, M. Wall, LCE analysis of buildings – Taking the step towards Net Zero Energy Buildings, *Energy and Buildings* 62 (2013) 381–391.
- Boemi *et al.* (2015). S.-N. Boemi, O. Irulegi, M. Santamouris, Energy Performance of Buildings: Energy Efficiency and Built Environment in Temperate Climates, Springer, 2015.

BPIE (2015). Nearly Zero Energy Buildings Definitions Across Europe, *Buildings Performance Institute Europe* (BPIE), Belgium, 2015.

BREEAM (2016). *Building Research Establishment Environmental Assessment Methodology*, 2016, <http://www.breeam.com>.

Brostrom *et al.* (2008). M. Brostrom, P. Eng, G. Howell, The challenges of designing and building a net zero energy home in a cold high-latitude climate, *3rd International Solar Cities Congress*, Adelaide-South Australia, Citeseer, 2008.

Building energy software tools directory: <http://www.buildingenergysoftwaretools.com/software-listing>, 2018.

Buonomano *et al.* (2016). A. Buonomano, G. Luca, U. Montanaro, A. Palombo, Innovative technologies for NZEBs: An energy and economic analysis tool and a case study of a non-residential building for the Mediterranean climate, *Energy and Buildings* 121 (2016) 318–343, <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.08.037>.

Carrier (2010). *Manual de aire Acondicionado*, Carrier Air Conditioning Company, Ed. Marcombo, Barcelona, Parte XII (espanhol).

Carrilho da Graça *et al.* (2011). G. Carrilho da Graça, A. Augusto, M.M. Lerer, Solar powered net zero energy houses for southern Europe: feasibility study, *Solar Energy* 86 (1) (2012) 634–646, <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2011.11.008>.

Castro R. (2011). *Uma Introdução às Energias Renováveis*, Editora IST Press, Lisboa.

Chastas *et al.* (2016). P. Chastas, T. Theodosiou, D. Bikas, Embodied energy in residential buildings-towards the nearly zero energy building: a literature review, *Buildings and Environment* 105 (2016) 267–282, <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.05.040>.

Clarke (2001). Clarke JA. *Energy Simulation in Building Design*. 2nd edition Oxford: Butterworth-Heinemann; 2001.

Conceição (2003). Conceição E., Numerical Simulation of Building Thermal Behaviour and Human Thermal Comfort Multi-Node Models, *Eighth International IBPSA Conference*, agosto de 2003, Eindhoven, Holanda, vol. 1, pp. 227-234.

Conceição *et al.* (2004). Conceição E., Silva A., Lúcio M. (2004). Numerical Study of Thermal Response of School Buildings in Winter Conditions. ROOMVENT 2004, Coimbra, Portugal.

Conceição E., Lúcio M., Brito V. (2006a), Avaliação das Condições de Conforto Interior em Espaços de Grande Dimensão: Parte I. Condições de Verão. *Revista de Informação Técnica e Científica: Construção Magazine*; vol. 18:4-8.

Conceição E., Lúcio M., Capela T., Brito V. (2006b). Evaluation of Thermal Comfort in Slightly Warm Ventilated Spaces in Non-Uniform Environments. *International Journal on Heating Air Conditioning and Refrigerating Research*; vol. 12: 451-458.

Conceição E., Lúcio M. (2006c). Projeto Térmico de Edifícios Escolares com topologia Complexa na Região do Algarve. *CIES 2006 – XIII Congresso Ibérico e VIII Congresso Ibero-Americano de Energia Solar*, 9-10 novembro 2006, Lisboa.

Conceição E., Lúcio M. (2006d). “Quality Inside Compartments of a School Building: Air Exchange Monitoring, Evaluation of Carbon Dioxide and Assessment of Ventilation Strategies. *The International Journal of Ventilation*; vol. 5:259-270.

- Conceição, E., Lúcio, M. (2006e). "Numerical Study of Thermal Response of School Buildings in Summer Conditions. *Healthy Buildings 2006*, Lisboa, Portugal.
- Conceição E., Lúcio M., e Brito V. (2007a). Avaliação das Condições de Conforto Interior em Espaços de Grande Dimensão: Parte II. Condições de Verão. *Revista de Informação Técnica e Científica: Construção Magazine*, 19; vol. 19:48-51.
- Conceição E., Lúcio M. (2007b). Conforto em Espaços Climatizados de Edifícios Escolares: Parte I - Conforto Térmico e Desconforto Térmico Local. *Revista O Instalador*; vol. 139:46-53.
- Conceição E., Lúcio M. (2007c). Conforto em Espaços Climatizados de Edifícios Escolares: Parte II - Conforto Térmico e Desconforto Térmico Local. *Revista O Instalador*; vol. 140:48-51.
- Conceição (2008) - E. Z. E. Conceição, A. L. C. F. Silvestre e T. C. F. M. Silva "Pré-Projecto do Comportamento Térmico de Edifícios num Campus Universitário", 1ª Conferências sobre Edifícios Eficientes, Faro, Portugal, 25 de janeiro de 2008.
- Conceição E., Lopes M., Lúcio M., Lopes M. (2008a). Application of an Indoor Greenhouse in the Energy and Thermal Comfort Performance in a Kindergarten School Building in the South of Portugal in Winter Conditions. *WSEAS Transactions on Environment and Development*; vol. 4:644-654.
- Conceição E., Lúcio M. (2008b). Projeto de um Sistema de Ventilação Eficiente de um Edifício Escolar em Condições de Inverno na Região do Algarve. Ordem dos Engenheiros, *Revista INGENIUM, IIª Série, Ordem dos Engenheiros*; vol. 107:76-80.
- Conceição E., Lúcio M. (2008c). Thermal study of school buildings in winter conditions. *Building and Environment*; vol. 43:782-792.
- Conceição E., Lúcio M., Vicente V., e Rosão V. (2008d). Evaluation of Local Thermal Discomfort in a Classroom Equipped with Cross Flow Ventilation. *International Journal of Ventilation*, Vol. 7:267-277.
- Conceição *et al.* (2009), E. Z. E. Conceição, M. M. J. R. Lúcio, A. E. B. Ruano e M. Crispim "Development of an Temperature Control Model used in HVAC Systems in School Spaces in the South of Portugal", *Building and environment*, Volume 44, No. 5, May 2009, pp. 871-877.
- Conceição E., e Lúcio M. (2010). Numerical simulation of passive and active solar strategies in buildings with complex topology. *Building Simulation* / Vol. 3, No. 3.
- Conceição E., Gomes J., Antão N., Lúcio M. (2012). Application of a developed adaptive model in the evaluation of thermal comfort in ventilated kindergarten occupied spaces. *Building and Environment*; vol. 50:190-201.
- Conceição E., Gomes J. e Sousa A. (2012b). Implementação de Sistemas AVAC com Controlo Inteligente Baseado no Índice PMV, *VI Encontro Nacional do Colégio de Engenharia Mecânica*, Coimbra, Portugal, 1 a 3 de março de 2012.
- Conceição E., Lúcio M. e Sousa A. (2014a). Avaliação das condições de conforto térmico a que os ocupantes estão sujeitos em espaços equipados com sistema de chão radiante aquecido, *14ª Jornadas de Engenharia de Climatização, Estratégias e Tecnologias de AVAC para a Sustentabilidade dos Edifícios*, Auditório da Sede Nacional da Ordem dos Engenheiros, Lisboa, 16 de outubro de 2014.

Conceição E., Sousa A. e Santiago C. (2014b). Desenvolvimento de um Novo Sistema de Controlo de Sistemas AVAC Baseados na Termofisiologia Humana, *14ª Jornadas de Engenharia de Climatização, Estratégias e Tecnologias de AVAC para a Sustentabilidade dos Edifícios*, Auditório da Sede Nacional da Ordem dos Engenheiros, Lisboa, 16 de outubro de 2014.

Conceição *et al.* (2019). Conceição, Eusébio Z. E., Sousa, António F. M., Gomes, João M. M., Ruano, António E., HVAC Systems Applied in University Buildings with Control Based on PMV and aPMV Indexes, *Inventions*:www.mdpi.com/journal/inventions.

Congedo *et al.* (2015). P.M. Congedo, C. Baglivo, D. D'Agostino, I. Zaca, Cost-optimal design for nearly zero energy office buildings located in warm climates, *Energy* 91 (2015) 967–982, <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2015.08.078>.

Crawley *et al* (2008), Crawley, Drury B. and Hand, Jon W. and Kummert, Michael and Griffith, Brent T. (2008) Contrasting the capabilities of building energy performance simulation programs. *Building and Environment*, 43 (4). pp.661-673. ISSN 0360-1323, <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.10.027>.

Dear R, Brager G, Cooper D. (1997). Developing an adaptive model of thermal comfort and preference. *ASHRAE RP-884*, 1997.

Dear R, Brager G. (2001). The adaptive model of thermal comfort and energy conservation in the built environment. *International Journal of Biometeorology* 2001;45:100–8.

Decreto-Lei n.º78/06 (2006). Sistema Nacional de Certificação Energética e da Qualidade do Ar Interior nos Edifícios (SCE). *Diário da República*, 4 de abril de 2006, Lisboa.

Decreto-Lei n.º 79/06 (2006) Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios (RSECE), *Diário da República*, 4 de Abril 2006. Lisboa.

Decreto-Lei n.º 80/06 (2006) – Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE). *Diário da República*, 4 de Abril 2006. Lisboa.

Deng *et al.* (2014) S. Deng, R.Z. Wang, Y.J. Dai How to evaluate performance of net zero energy building - A literature research, *Energy* 71 (2014) 1 - 16.

Direção Geral de Energia e Geologia (2002). Programa E4 - Eficiência Energética nos Edifícios. *Ministério da Economia*, Lisboa. ISBN 972-8268-25-4.

Dixit, M. (2017). Life cycle embodied energy analysis of residential buildings: A review of literature to investigate embodied energy parameters, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 79 (2017) 390-413.

Du Can e Price (2008). S. de la Rue du Can, L. Price, Sectoral trends in global energy use and greenhouse gas emissions, *Energy Policy* 36 (4) (2008) 1386–1403.

Duffie e Beckman (1980). J. A. Duffie and W. A. Beckman, *Solar Engineering of Thermal Processes*, Editora Wiley (1980).

Dyrbol *et al.* (2010). S. Dyrbol, K.E. Thomsen, T. Albæk, *European Directive on the Energy Performance of Buildings: Energy Policies in Europe—Examples of Best Practice*, 2010, pp. 126–140.

Ekici and Aksoy (2009). Ekici BB, Aksoy UT. Prediction of building energy consumption by using artificial neural networks. *Advances in Engineering Software* 2009;40(5):356–62.

- EBC (2014). Energy in Buildings and Communities Programme, *Towards Net Zero Energy Solar Buildings*, Annex 52/Task 40, EBC Executive Committee Support Services Unit, 2014.
- EISA (2007). United States of America Federal Government, Energy Independence and Security Act, 2007 (January 2007): <https://www.gpo.gov/fdsys/pkg/BILLS-110hr6enr/pdf/BILLS-110hr6enr.pdf>.
- EN 12975 (2006) Thermal Solar Systems and Components – Solar Collectors – Part 1: General requirements.
- Enerdata (2003) – ISI-FhG, Energy Efficiency in the European Union 1990-2001. *SAVE-ODYSSEE Project on Energy Efficiency Indicators*.
- EPBD (2010). European Parliament and the Council, European Performance of Buildings Directive, 2010, available from: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32010L0031&from=EN>.
- Fanger, P. O. (1970). Thermal comfort: analysis and applications in environmental engineering. *McGraw-Hill Book Company*, USA.
- Fanger, O. (1972). Thermal Comfort Analysis and Application in Environmental Engineering, *McGraw-Hill*, 1972.
- Fanger, P. O. (1988). Introduction of the Olf and the Decipol Units to Quantify Air Pollution Perceived by Humans Indoors and Outdoors. *Energy and Buildings*; vol. 12:1-6.
- Fanger, P. O. (2005). What is IAQ? *Journal Indoor Air 2006*, 10th Indoor Air Conference. Beijing, China; vol. 16:328–334.
- Fridleifsson (2001). Geothermal Energy for the Benefit of the People, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.
- Good *et al.* (2015). C. Good, I. Andresen, A. G. Hestnes, Solar Energy for Net Zero Energy Buildings – A Comparison Between Solar Thermal, PV and Photovoltaic–thermal (PV/T) Systems, *Solar Energy* 122 (2015) 986–996.
- Gonçalves H., Graça J. M. (2004) Conceitos Bioclimáticos para os Edifícios em Portugal., *Direção Geral de Geologia e Energia*, Lisboa. ISBN 972-8268-34-3.
- Gonçalves H., Nascimento C. (2005). Prémio DGE 2003 – Eficiência Energética dos edifícios. *Direção Geral de Geologia e Energia*, Lisboa. ISBN 972-8268-36-X.
- Houghten e Yaglou (1923). Determining of the comfort zone. *ASHVE Transactions*, pp. 361-379, 1923.
- Hyde *et al* (2012). R. Hyde, U. Rajapaksha, I. Rajapaksha, M.O. Riain, F. Silva, A design framework for achieving net zero energy commercial buildings: *46th Annual Conference of the Architectural Science Association*, ASA/ANZAScA, Griffith University, 2012, p. 2012.
- IEA (2011). *Instalaciones Solares Fotovoltaicas: Pliego de Condiciones Técnicas de Instalaciones Conectadas a Red*. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (Espanha).
- IEA (2015a). *2015 Renewable Energy Data Book*, International Energy Agency.

IEA (2015b). Building Energy Performance Metrics - Supporting Energy Efficiency Progress in Major Economies, *Building Energy Efficiency Taskgroup, International Energy Agency*.

IEA (2016). *Energy Efficiency Indicators Highlights 2016*, International Energy Agency.

IEA (2018) Key world energy statistics, *International energy Agency*.

IEC 60891(2009). *Procedures for temperature and irradiance corrections to measured I-V characteristics of crystalline silicon photovoltaic devices*. Amendment 1 (1992)".

IEC 60904-1 (2006). *Photovoltaic devices — Part 1: Measurements of photovoltaic current-voltage characteristics*.

IEC 60904-2 (2015). *Photovoltaic devices – Part 2: Requirements for photovoltaic reference devices*.

IEC 60904-3 (2016), *Photovoltaic devices - Part 3: Measurement principles for terrestrial photovoltaic (PV) solar devices with reference spectral irradiance data*.

IEC 61215(2016). *Crystalline Silicon Terrestrial Photovoltaic (PV) Modules – Design, Qualification and type approval*.

Iqbal, M. (1983). *An introduction to solar radiation*, Academic Press, 1st edition, 1983.

Incropera (2014). Bergman, Lavine, Incropera e Dewitt. *Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa*, 7ª edição, LTC Editora.

ISO 7730 (2005). Ergonomics of the Thermal Environments – Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria. *International Standard*. Switzerland.

ISO 13790 (2008). *Energy performance of buildings. Calculation of energy use for space heating and cooling*. Geneva, Switzerland: ISO; 2008.

Kalogirou (1997). Kalogirou SA, Neocleous CC, Schizas CN. Building heating load estimation using artificial neural networks. In: *Proceedings of the 17th international conference on parallel architectures and compilation techniques*. 1997.

Kalogirou (2006). Kalogirou SA. Artificial neural networks in energy applications in buildings. *International Journal of Low-Carbon Technologies* 2006;1(3):201–16.

Kim *et al.* (2014). Kim, Jang, Shin e Gwang-Hee Kim. Economic Feasibility Analysis of the Application of Geothermal Energy Facilities to Public Building Structures, *Sustainability* 2014.

Kolokotsa *et al.* (2011). Kolokotsa D., Rovas D., Kosmatopoulos E. e Kalaitzakis K., A Roadmap towards intelligent net-zero and positive-energy buildings, *Solar Energy*, Vol. 85, Issue 12, December 2011, Pages 3067-3084.

Kreider J. (2001). *Handbook of Heating, Ventilation and Air Conditioning*, CRC Press.

Kurnitski *et al.* (2011). J. Kurnitski, A. Saari, T. Kalamees, M. Vuolle, J. Niemela, T. Tark, Cost optimal and nearly zero (nZEB) energy performance calculations for residential buildings with REHVA definition for nZEB national implementation, *Energy Buildings* 43 (11) (2011) 3279–3288, <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.08.033>.

Levine, K. B.; Sterling, E. M. and Collet, C. W. (1993). “Estimation of Outdoor Air Ventilation Rates Using CO₂ Concentrations”, *ASHRAE Transactions*, Part I, pp. 1554-1559.

- D.H.W. Li, L. Yang, J.C. Lam, Zero energy buildings and sustainable development implications—a review, *Energy* 54 (2013) 1–10, <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2013.01.070>.
- Luque (2003). *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*, editado por Antonio Luque e Steven Hegedus, editora Wiley, 2003, caps. 10 e 20.
- Marique e Reiter (2014), A.F. Marique, S. Reiter, A simplified framework to assess the feasibility of zero-energy the neighbourhood/community scale, *Energy and Buildings* 82 (2014) 114–122, <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.07.006>.
- Markvart T. (1994). *Solar electricity*, editora John Wiley & Sons.
- McQuiston (2005). McQuiston FC, Parker JD, Spitler JD. *Heating, Ventilating and Air Conditioning Analysis and Design*. 6th edition Wiley; 2005.
- Milenic, Vasiljevic e Vranjes (2009). Criteria for use of groundwater as renewable energy source in geothermal heat pump systems for building heating/cooling purposes, *Energy and Buildings* 2009.
- Nicol, F., Roaf S. (1996). Pioneering new indoor temperature standard: the Pakistan project. *Energy Build*; vol. 23:169-74.
- Nicol F., Humphreys M., (2002). Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings. *Energy Build*; vol. 34: 563–572.
- Nicol, F. (2004). Adaptive thermal comfort standards in the hot-humid tropics. *Energy and Buildings* 2004; 36:628–37. Elsevier.
- Nicol F. Wilson M, Chiancarella (2006). Using field measurements of desktop illuminance in European offices to investigate its dependence on outdoor conditions and its effect on occupant satisfaction, and the use of lights and blinds. *Energy Build* 38:802-813.
- Olesen B. (2002). Radiant Floor Heating In Theory and Practice. *ASHRAE Journal American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*, July 2002; vol. 7:19-24
- Olesen B. (2004). International standards for the indoor environment. *Journal Indoor Air*; vol. 14:18-26.
- Olofsson *et al* (1998). Olofsson T, Andersson S, Östin R. A method for predicting the annual building heating demand based on limited performance data. *Energy and Buildings* 1998;28(1):101–8.
- Olofsson *et al* (2001). Olofsson T, Andersson S. Long-term energy demand predictions based on shortterm measured data. *Energy and Buildings* 2001;33(2):85–91.
- Omer A. M. (2008). Renewable building energy systems and passive human comfort solutions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*; vol.12:1562-1587
- Pinheiro M.D. (2006). “Ambiente e Construção Saudável”. Instituto do Ambiente, Amadora, Portugal. ISBN: 972-8577-32-X.
- Pinto M., Freitas V., Viegas J. (2007). Qualidade do ambiente interior em edifícios de habitação. *Engenharia e Vida*; vol. 38:34-43.

- Quang (2013). Quang, T. N., Optimisation of indoor environmental quality and energy consumption within office buildings, PhD Publication, *Queensland University of Technology*, 2013.
- Quang *et al* (2014) Quang, T. N., Hea C., Knibbs L. D., de Dear R. and Morawskaa L., Co-optimisation of indoor environmental quality and energy consumption within urban office buildings, *Energy and Buildings*, Volume 85, December 2014, Pages 225–234.
- Reger, Goode e Mercer (2010). *Química, Princípios e Aplicações*, Editora Calouste Gulbenkian.
- REHVA (2013). <http://www.rehva.eu/publications-and-resources/hvac-journal/2013/032013>
- Rodrigues *et al* (2010). Rodrigues, M.; Leao, C. P. and Barroso, M. P. Evaluation and perception of thermal comfort in higher education libraries, *6th International Symposium on Occupational Safety and Hygiene*, Feb 11-12, 2010: 457-461.
- Roriz, L., Rosendo, J., Lourenço F. e Calhau K. (2010). *Energia Solar em Edifícios*, 1ª edição, março de 2010, Edições Orion.
- Santos C., Matias L. (2006). Coeficientes de transmissão térmica de elementos da envolvente dos edifícios – Versão atualizada 2006. *Laboratório Nacional de Engenharia Civil*, Lisboa.
- Sartori *et al.*(2010), I. Sartori, J. Candanedo, S. Geier, R. Lollini, A. Athienitis, F. Garde, L. Pagliano, Comfort and Energy Performance Recommendations for Net Zero Energy Buildings, *the Proceedings of EuroSun*, 2010.
- Sartori *et al.* (2012). A. Napolitano, K. Voss, Net zero energy buildings: a consistent definition framework, *Energy and Buildings*, 48 (2012) 220–232, <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.01.032>.
- Schneider Electric (2019). https://download.schneider-electric.com/files?p_enDocType=User+guide&p_File_Name=63230-501-209+%28web%29.pdf&p_Doc_Ref=63230-501-209
- Singh *et al.* (2011). Singh M., Mahapatra S, Atreya S., Adaptive thermal comfort model for different climatic zones of North-East India. *Applied Energy*, vol. 88:2420-2428.
- Torcellini *et al.* (2006). P. Torcellini, S. Pless, and M. Deru D. Crawley. Zero Energy Buildings: A Critical Look at the Definition, *National Renewable Energy Laboratory*, NREL/CP-550-39833, 2006.
- Tumminia *et al.* (2017). G. Tumminia, F. Guarino, S. Longo, M. Mistretta, M. Cellura, D. Aloisio, V. Antonucci, Life cycle energy performances of a Net Zero Energy prefabricated building in Sicily, *ScienceDirect Energy Procedia* 140 (2017) 486–494.
- UNEP (2010). *United nations Environment Programme's Common Carbon Metric* (UNEP SBCI), 2010.
- US DOE/EERE (2009) *United States Department of Energy*.
- Van der Linden *et al* (2006). Van der Linden AC, Boerstra AK, Raue SR, Kurves RJ, de Dear R.: Adaptive temperature limits: a new guideline in the Netherlands a new approach for the assessment of building performance with respect to thermal indoor climate. *Energy and Buildings* 2006 38:6–17. Elsevier.

- Viegas J. (2000). Contribuição da Ventilação para a Qualidade do Ambiente Interior em Edifícios, *Seminário Ambiente em Edifícios Urbanos 2000, Contribuição da Ventilação para a Qualidade do Ambiente Interior em Edifícios. Laboratório Nacional de Engenharia Civil*, Lisboa. ISBN 972-49-1851-3.
- Voss *et al.* (2010). K. Voss, J.A. Candanedo, S. Geier, H. Gonçalves, M. Hall, P. Heiselberg, B. Karlsson, E. Musall, A. Napolitano, I. Sartori, P. Torcellini, J. Widén, Load Matching and Grid Interaction of Net Zero Energy Buildings, International Solar Energy Society, Austria, 2010.
- Voss e Sartori, (2012). K. Voss, I. Sartori and R. Lollini, Nearly-zero, Net-zero and Plus Energy Buildings, - How definitions & regulations affect the solutions, RHEVA Journal, Dezembro de 2012:
www.rehva.eu/fileadmin/hvac-dictio/06_2012/p23-27_Voss_RJ1206.pdf.
- Wells *et al.* (2018) Louise Wells, Behzad Rismanchi, Lu Aye, A review of Net Zero Energy Buildings with reflections on the Australian context, *Energy and Buildings*, 158 (2018) 616–628.
- Westphal e Lamberts (2004). Westphal FS, Lamberts R., The use of simplified weather data to estimate thermal loads of non-residential buildings. *Energy and Buildings* 2004; 36(8):847–54.
- Winslow, Herrington e Gagge (1937). Physiological reactions of the human body to varying environmental temperatures, *American Journal of Physiology*, 120, pp. 1-22, 1937.
- Yao *et al* (2011). Yao, R., Li, B. and Liu, J. A theoretical adaptive model of thermal comfort – Adaptive Predicted Mean Vote (aPMV). *Building and Environment*, 44 (10). pp. 2089-2096. ISSN 0360-1323
- Yao *et al* (2010). Yao R., Liu J., Li B. Occupants’ adaptive responses and perception of thermal environment in naturally conditioned university classrooms. *Applied Energy*; vol. 87:1015-1022.
- Yi *et al.* (2016). Hwang Yi, Ravi S. Srinivasan, William W. Braham, David R. Tilley (2016) An ecological understanding of net-zero energy building: Evaluation of sustainability based on emergy theory, *Journal of Cleaner Production* 143 (2017) 654 e 671.
- Zeiler *et al.* (2016). W. Zeiler, K. Gvozdenovic, K. de Bont, W. Maassen, Toward cost-effective nearly zero energy buildings: the Dutch Situation, *Science and Technology in the Built Environment* 22 (7) (2016) 911–927, <http://dx.doi.org/10.1080/23744731.2016.1187552>.
- Zhao (2012), Zhao, Hai-xiang and Magoulès, Frédéric, A review on the prediction of building energy consumption, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16 (2012) 3586– 3592