

Laura Machado Santana Bento

***EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFÍCIOS
UNIVERSITÁRIOS APLICANDO ENERGIAS RENOVÁVEIS***



UNIVERSIDADE DO ALGARVE

Dissertação de Mestrado

2016

Laura Machado Santana Bento

***EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFÍCIOS
UNIVERSITÁRIOS APLICANDO ENERGIAS RENOVÁVEIS***

Mestrado Integrado em Engenharia do Ambiente

Trabalho efetuado sobre a orientação de:

Professor Doutor Eusébio Zeferino Encarnação da Conceição



UNIVERSIDADE DO ALGARVE

Dissertação de Mestrado

2016

“Eficiência energética em edifícios universitários aplicando energias renováveis”

Declaração de autoria de trabalho:

Declaro ser a autora deste trabalho, que é original e inédito.

Autores e trabalhos consultados estão devidamente citados no texto e constam da listagem de referências incluída.

Laura Machado Santana Bento

Copyright © Laura Machado Santana Bento

“A Universidade do Algarve reserva para si o direito, em conformidade com o disposto no Código do Direito de Autor e dos Direitos Conexos, de arquivar, reproduzir e publicar a obra, independentemente do meio utilizado, bem como de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição para fins meramente educacionais ou de investigação e não comerciais, conquanto seja dado o devido crédito ao autor e editor respetivos.”

Agradecimentos

Em primeiro lugar, gostaria de manifestar o meu sincero agradecimento ao Professor Doutor Eusébio Conceição, que enquanto meu orientador, sempre se mostrou incrivelmente disponível, cooperativo, paciente e motivador ao longo de todas as fases do trabalho. Devo-lhe ainda um agradecimento extra por me ter envolvido no projeto da ASHRAE que me proporcionou uma experiência excepcional.

Aos meus pais, um agradecimento especial, pelos princípios, valores e ensinamentos transmitidos ao longo da minha vida, que fizeram de mim quem sou, pelo esforço feito para que eu tivesse a oportunidade de frequentar o ensino superior e para que pudesse “matar saudades” aos fins-de-semana, pelo carinho e pelo apoio prestado em todos os momentos. Obrigada por tudo, sem eles nada disto seria possível. Aos meus avós paternos e avó materna agradeço igualmente pelo apoio e pelo contributo feito nos meus estudos. À minha irmã, agradeço a amizade e cumplicidade. Agradeço também à restante família.

Aos meus colegas de curso e amigos que percorreram este mesmo caminho comigo agradeço por me apoiarem, ajudarem e incentivarem, pelos momentos que passámos juntos e pelas recordações que levo do meu percurso académico e do Algarve.

Por fim gostaria também de mencionar um agradecimento àqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram para a elaboração desta dissertação, que me acompanharam e viram evoluir durante todo do percurso académico.

Resumo

Em Portugal, tem-se registado um aumento significativo do consumo de energia nos edifícios, sustentado em parte pelo uso intensivo de equipamentos elétricos e pelo comportamento dissipativo do edifício.

Este estudo teve como objetivo otimizar o consumo de energia num edifício pertencente à Universidade do Algarve, com recurso exclusivo a energias renováveis, nomeadamente energias eólica e solar.

Para produção de energia elétrica a ser consumida pelo sistema de elétrico do edifício é analisada a viabilidade da instalação de uma turbina eólica no edifício acoplada a um dispositivo que concentra o escoamento. Foi projetado o dispositivo que fará a aceleração e o direcionamento do escoamento para a turbina e posteriormente foi simulada a intensidade e a direção do escoamento.

A climatização dos compartimentos do edifício, em condições de verão e inverno, é feita com recurso a energia solar. Durante o inverno simulou-se a utilização de coletores solares que aquecem os compartimentos através de um sistema de condutas. Em condições de verão foi simulado o arrefecimento dos espaços através de um sistema de ar-condicionado com ciclo de absorção $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$ associado a coletores solares.

Os resultados da simulação eólica mostram que a utilização do dispositivo permite acelerar a massa de ar até 10,5 m/s, com esta velocidade de vento um aerogerador donQi 175KW consegue produzir aproximadamente 20,5 KW.h/dia. Estima-se que esta potência elétrica tenha capacidade de fornecer energia para os computadores do edifício, relativamente à iluminação recomenda-se que se recorra à iluminação natural dos compartimentos sempre que possível.

Os resultados da simulação solar mostram que em condições de inverno o sistema de ar-condicionado produz energia suficiente para fornecer condições de conforto em todos os compartimentos com regime de climatização e ocupação totais. Em condições de verão o sistema de ar-condicionado apenas consegue garantir condições aceitáveis de conforto térmico em 1/3 dos compartimentos climatizados.

Palavras-Chave: Energias renováveis, edifícios, climatização, ar-condicionado, turbina eólica em edifícios.

Abstract

Portugal has been registering a significant growth in buildings' energy consumption, this results from intensive use of equipment (lighting system, warming and cooling systems and electrical devices) and the buildings' own dissipative thermal behavior.

This study aims to improve the energy consumption of a building located at the University of Algarve, using renewable energies, specially wind and solar energy.

It was analyzed the feasibility of the installation of a wind turbine attached to a concentrator flow device, to produce electricity to be consumed by the lighting system of the building. A computer drawing program was used to design the device that made the acceleration and direction of the flow to the turbine and later tested the intensity and direction of the flow.

The air-conditioning of the building's spaces, in winter and summer conditions, is made using solar energy. In winter conditions the use of solar collectors to provide heat to indoor rooms through a duct system was analyzed. In summer conditions, the cooling of several rooms of the building was simulated using a air-conditioning system with NH₃-H₂O absorption cycle attached to solar collectors.

The aerodynamics' simulation results showed that the use of the device accelerates the air flow up to a maximum of 10,5 m/s, with this wind speed a donQi 175KW wind turbine could produce around 20,5 KW.h/day. This electricity is enough for the computers of the building, in what concerns the illumination, the use of natural light as much as possible would be suitable.

The results of the solar numerical simulation revealed that in winter conditions the solar air-conditioning system would be able to provide comfortable thermal conditions in every compartment of the building. In summer conditions the air-conditioning system could only assure acceptable thermal comfort conditions to 1/3 of the spaces with air-conditioning system.

Keywords: Renewable energies, buildings, cooling, air-conditioning, wind turbine in buildings.

Índice

Resumo	ii
Abstract	iii
Siglas e Abreviaturas.....	x
Parâmetros e Variáveis	xi
1. Estrutura e Organização da Dissertação	1
2. Objetivos.....	2
3. Motivação e enquadramento	3
4. Revisão Bibliográfica.....	5
4.1. Caracterização energética em Portugal.....	5
4.2. Energias renováveis	6
4.2.1. Energia eólica.....	6
4.2.1.1. Modo de funcionamento.....	7
4.2.1.2. Turbinas de pequena escala.....	8
4.2.1.3. Fatores que influenciam o vento urbano	9
4.2.1.4. Sistemas de direcionamento, aceleração e concentração do vento	10
4.2.2. Energia solar	11
4.2.2.1. Coletores solares térmicos.....	12
4.2.2.2. Coletores Planos.....	13
4.2.2.3. Coletores Compostos Parabólicos	13
4.2.2.4. Coletores de Vácuo	14
4.2.2.5. Coletores	15
4.2.3. Conforto Térmico	17
4.2.4. <i>Predicted Mean Vote (PMV)</i>	18
4.2.5. <i>Predicted Percentage Dissatisfied (PPD)</i>	19
4.2.6. Ventilação	20
4.2.7. Estudos efetuados em estabelecimentos de ensino	21
4.2.8. Consumos energéticos em estabelecimentos de ensino	22
4.3. Necessidade de climatização	24
4.3.1. Refrigerantes.....	27
4.4. Sistemas de refrigeração	29
4.4.1. Refrigeração por ciclo de compressão de vapor	30
4.4.2. Refrigeração por ciclo de absorção	30
4.4.2.1. Descrição do processo de refrigeração por ciclo de absorção – com bomba ...	31
4.4.2.2. Descrição do processo de refrigeração por ciclo de absorção – sem bomba ...	32

4.5.	Sistemas AVAC.....	35
4.6.	Ar-condicionado solar	36
5.	Modelos numéricos e Metodologia	40
5.1.	Eólica.....	40
5.2.	Solar	41
5.2.1.	Equações	42
5.2.2.	Sistema de controlo.....	47
6.	Projeto ASHRAE.....	49
7.	Caso de estudo.....	50
7.1.	Eólica.....	51
7.2.	Solar	52
8.	Resultados.....	63
8.1.	Eólica.....	63
8.2.	Solar	67
8.2.1.	Inverno.....	67
8.2.2.	Verão.....	75
8.2.2.1.	Ocupação e climatização totais.....	76
8.2.2.2.	Ocupação e climatização parcial	81
9.	Aplicações futuras.....	88
10.	Conclusões	89
11.	Referências Bibliográficas.....	92

Índice de Figuras

Figura 4.1: Componentes de uma turbina eólica.....	7
Figura 4.2: [a] Torres do World Trade Center no Bahrain. [b] Torre Strata em Londres. [c] Aerodinamismo de um edifício residencial.	8
Figura 4.3. Localizações das turbinas de forma a evitar a zona de turbulência.	10
Figura 4.4: [a] Projeto PUMBA na Praça do Bastion [b] Projeto PUMBA Amaay [c] Turbina eólica em forma de árvore.....	11
Figura 4.5: Representação de um coletor composto parabólico.	14
Figura 4.6: (a) Esquema ilustrativo de uma coletor solar a vácuo. (b) Interior de um coletor solar com tubos de vácuo.....	14
Figura 4.7: Distância mínima entra fileiras de coletores solares.	16
Figura 4.8 : PPD em função do PMV.	19
Figura 4.9: Fatores que alteram a qualidade do ar num espaço.	25
Figura 4.10: Esquema básico do processo de refrigeração.	29
Figura 4.11: Esquema de uma máquina frigorífica de absorção.	34
Figura 4.12: Distribuição dos consumos energéticos em diferentes tipologias de edifícios de serviços em 2001 nos USA.....	36
Figura 5.1: [a] Simulação CFD demonstrando o fluxo de ar em torno de um edifício e obstáculos. [b] Simulação CFD demonstrando o fluxo de ar em torno de um corpo humano. .	41
Figura 5.2: Simulação CFD do movimento transitório de mecha incidente nas lâminas de uma turbina.....	41
Figura 5.3: Esquema do ciclo de absorção a $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$ de um sistema AVAC.	43
Figura 5.4: Sistema de controlo do PMV implementado ao sistema de ar-condicionado.	48
Figura 6.1. [a] Desenho assistido por computador da montagem experimental do sistema do frigorífico solar. [b] Montagem experimental do sistema frigorífico solar.	49
Figura 7.1: Esquema ilustrativo das simulações efetuadas na dissertação.....	51
Figura 7.2: Representação genérica de um paraboloide hiperbólico.	51
Figura 7.3: Dispositivo de concentração e aceleração do escoamento.	52
Figura 7.4: Desenho assistido por computador representando o edifício de estudo, Complexo Pedagógico, pertencente ao campus de Gambelas da Universidade do Algarve....	52
Figura 7.5: Desenho assistido por computador representando a vista isométrica sudeste do piso térreo do edifício do Complexo Pedagógico, pertencente ao campus de Gambelas da Universidade do Algarve.	53
Figura 7.6: Desenho assistido por computador representando a vista isométrica sudeste do 1º piso do Complexo Pedagógico, pertencente ao campus de Gambelas da Universidade do Algarve.	53
Figura 7.7: Desenho assistido por computador representando a vista isométrica sudeste do 2º piso do Complexo Pedagógico, pertencente ao campus de Gambelas da Universidade do Algarve.	53
Figura 7.8 Desenho assistido por computador representando edifício do Complexo Pedagógico da Universidade do Algarve, campus de Gambelas, com coletores solares instalados no telhado.	57
Figura 7.9: Esquema da climatização dos compartimentos na situação de verão.....	58
Figura 7.10: Esquema da climatização dos compartimentos na situação de inverno.	59
Figura 7.11: Comparação do desempenho de vários coletores solares existentes no mercado. 60	
Figura 8.1: Campo vetorial da velocidade do ar ao passar pelo dispositivo de concentração e aceleração do escoamento (a) vista de topo, plano xy, (b) vista lateral, plano xyz (c) vista isométrica, plano yz.	64

Figura 8.2: Representação do campo da velocidade do ar no plano xz da zona central.	64
Figura 8.3: Aerogerador urbano donQi 1,75 kW.	65
Figura 8.4: Curva de produção anual da turbina donQi 1,75 KW em função da velocidade do vento.	65
Figura 8.5: Diferentes áreas de fileiras de coletores, consideradas no topo do edifício de estudo.	67
Figura 8.6: Radiação incidente nas diferentes áreas de fileiras de coletores solares, em condições de inverno.	68
Figura 8.7: Evolução ao longo do dia da temperatura do fluido armazenado no depósito em condições de inverno.	69
Figura 8.8: Evolução da concentração de dióxido de carbono (CO ₂) ao longo do dia no(a): (a) Anfiteatro, Grande Auditório e Gabinete de apoio técnico (b) Sala Pequena (E), Sala Grande (E), Sala Média (W) e Sala Grande (W) do Complexo Pedagógico da Universidade do Algarve, para as situações apenas com ventilação, ar-condicionado por compressão de vapor e ar-condicionado com coletores e termoconvectores, na simulação de inverno.	71
Figura 8.9: Simulação de inverno mostrando a evolução do índice PMV ao longo do dia no(a): (a) Anfiteatro, Grande Auditório e Gabinete de apoio técnico (b) Sala Pequena (E), Sala Grande (E), Sala Média (W) e Sala Grande (W) do Complexo Pedagógico da Universidade do Algarve, para a situações em que apenas há ventilação.	73
Figura 8.10: Simulação de inverno mostrando a evolução do índice PMV ao longo do dia no(a): (a) Anfiteatro, Grande Auditório e Gabinete de apoio técnico (b) Sala Pequena (E), Sala Grande (E), Sala Média (W) e Sala Grande (W) do Complexo Pedagógico da Universidade do Algarve, para a situações com sistema de climatização por compressão de vapor.....	74
Figura 8.11: Simulação de inverno mostrando a evolução do índice PMV ao longo do dia no(a): (a) Anfiteatro, Grande Auditório e Gabinete de apoio técnico (b) Sala Pequena (E), Sala Grande (E), Sala Média (W) e Sala Grande (W) do Complexo Pedagógico da Universidade do Algarve, para a situações com sistema de climatização AVAC com coletores e termoconvectores.	74
Figura 8.12: Radiação incidente nas diferentes áreas de fileiras de coletores solares na simulação de verão com regimes de ocupação e climatização totais.....	76
Figura 8.13: Simulação de verão mostrando a evolução ao longo do dia da temperatura do fluido armazenado no depósito do Complexo Pedagógico da Universidade do Algarve com regimes de ocupação e climatização totais.	77
Figura 8.14: Simulação de verão com regimes de ocupação e climatização totais mostrando a evolução do índice PMV ao longo do dia no(a): (a) Anfiteatro, Grande Auditório e Gabinete de apoio técnico (b) Sala Pequena (E), Sala Grande (E), Sala Média (W) e Sala Grande (W) do Complexo Pedagógico da Universidade do Algarve, para a situações onde é apenas aplicada ventilação aos compartimentos.....	80
Figura 8.15: Simulação de verão com regimes de ocupação e climatização totais mostrando a evolução do índice PMV ao longo do dia no(a): (a) Anfiteatro, Grande Auditório e Gabinete de apoio técnico (b) Sala Pequena (E), Sala Grande (E), Sala Média (W) e Sala Grande (W) do Complexo Pedagógico da Universidade do Algarve, para a situações com sistema de climatização elétrica.	80
Figura 8.16: Simulação de verão com regimes de ocupação e climatização totais mostrando a evolução do índice PMV ao longo do dia no(a): (a) Anfiteatro, Grande Auditório e Gabinete de apoio técnico (b) Sala Pequena (E), Sala Grande (E), Sala Média (W) e Sala Grande (W) do Complexo Pedagógico da Universidade do Algarve, para a situações com sistema de climatização por ciclo de absorção.....	81

- Figura 8.17:** Simulação de verão mostrando a evolução ao longo do dia da temperatura do fluido armazenado no depósito do Complexo Pedagógico da Universidade do Algarve com ocupação e climatização parciais. 82
- Figura 8.18:** Evolução da concentração de dióxido de carbono (CO₂) ao longo do dia no(a): **(a)** Anfiteatro, Grande Auditório e Gabinete de apoio técnico **(b)** Sala Pequena (E), Sala Grande (E), Sala Média (W) e Sala Grande (W) do Complexo Pedagógico da Universidade do Algarve, para as situações com sistema de climatização desligada, ar-condicionado por compressão de vapor e ar-condicionado por ciclo de absorção, na simulação de verão com regimes de ocupação e climatização parciais. 84
- Figura 8.19:** Simulação de verão com regimes de ocupação e climatização parciais mostrando a evolução do índice PMV ao longo do dia no(a): **(a)** Anfiteatro, Grande Auditório e Gabinete de apoio técnico **(b)** Sala Pequena (E), Sala Grande (E), Sala Média (W) e Sala Grande (W) do Complexo Pedagógico da Universidade do Algarve, para a situações em que é apenas aplicada uma taxa de ventilação. 85
- Figura 8.20:** Simulação de verão com regimes de ocupação e climatização parciais mostrando a evolução do índice PMV ao longo do dia no(a): **(a)** Anfiteatro, Grande Auditório e Gabinete de apoio técnico **(b)** Sala Pequena (E), Sala Grande (E), Sala Média (W) e Sala Grande (W) do Complexo Pedagógico da Universidade do Algarve, para a situações com sistema de climatização por compressão de vapor. 86
- Figura 8.21:** Simulação de verão com regimes de ocupação e climatização parciais mostrando a evolução do índice PMV ao longo do dia no(a): **(a)** Anfiteatro, Grande Auditório e Gabinete de apoio técnico **(b)** Sala Pequena (E), Sala Grande (E), Sala Média (W) e Sala Grande (W) do Complexo Pedagógico da Universidade do Algarve, para a situações com sistema de climatização por ciclo de absorção. 86

Índice de Tabelas

Tabela 4.1: Coletores solares não-concentradores	12
Tabela 4.2: Variação do ângulo de inclinação ideal do coletor solar aplicado às cidades do Porto, Lisboa e Faro.	16
Tabela 4.3: Distância mínima entre fileiras de coletores, nas cidades do Porto, Lisboa e Faro. 16	
Tabela 4.4: Temperaturas recomendadas de forma a garantir a satisfação térmica de 90% dos ocupantes com atividade física reduzida.	18
Tabela 4.5: Escala de sete pontos relativa à sensação térmica corporal.....	19
Tabela 4.6: Categorias do ambiente térmico.	19
Tabela 4.7: Principais propriedades físicas e químicas do amoníaco.....	28
Tabela 7.1: Numeração dos compartimentos climatizados no interior do Complexo Pedagógico, pertencente das zonas envidraçadas, campus de Gambelas da Universidade do Algarve.	54
Tabela 7.2: Dados de entrada inseridos no programa Efficient Buildings.....	56
Tabela 7.3: Regime de ocupação total dos compartimentos.	61
Tabela 7.4: Regime de climatização total dos compartimentos.	61
Tabela 7.5: Regime de ocupação parcial dos compartimentos.	62
Tabela 7.6: Regime de climatização parcial dos compartimentos.	62
Tabela 7.7: Taxa de ventilação aplicada aos compartimentos com ocupação.	62
Tabela 8.1: Estimativa do consumo do sistema elétrico e de iluminação nos diferentes compartimentos do edifício de estudo.	66
Tabela 8.2: Simulação de inverno representando as horas de desconforto por frio sentidas pelos ocupantes nas situações em que apenas há ventilação, com sistema AVAC com coletores e termoconvectores, de todos os compartimentos do edifício do Complexo Pedagógico, durante os períodos da manhã e da tarde.....	70
Tabela 8.3: Simulação de inverno representando os consumos do ar-condicionado por compressão de vapor e com coletores e termoconvectores de todas as salas climatizadas do edifício do Complexo Pedagógico, durante os períodos da manhã e da tarde.	72
Tabela 8.4: Simulação de verão com regimes de ocupação e climatização totais representando as horas de desconforto por calor sentidas pelos ocupantes nas situações em que o sistema de climatização está desativado, com sistema ar-condicionado por compressão de vapor e por ciclo de absorção, de todos os compartimentos do edifício do Complexo Pedagógico.	77
Tabela 8.5: Simulação de verão com regimes de ocupação e climatização totais representando os consumos do ar-condicionado por compressão de vapor e por ciclo de absorção, de todas as salas climatizadas do edifício do Complexo Pedagógico.	78
Tabela 8.6: Simulação de verão com regimes de ocupação e climatização parciais representando as horas de desconforto por calor sentidas pelos ocupantes nas situações em que é apenas aplicada uma taxa de ventilação, com sistema ar-condicionado por compressão de vapor e por ciclo de absorção, de todos os compartimentos do edifício do Complexo Pedagógico.	83
Tabela 8.7: Simulação de verão com regimes de ocupação e climatização totais representando os consumos do ar-condicionado por compressão de vapor e por ciclo de absorção, de todas as salas climatizadas do edifício do Complexo Pedagógico.	84

Siglas e Abreviaturas

ASHRAE – American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers

AVAC – Aquecimento, Ventilação e Ar-Condicionado

CFC – Clorofluorcarbonetos

CFD – Computational Fluid Dynamics

CO₂ – Dióxido de Carbono

COP – Coefficient of Performance

CPC – Coletor Parabólico Composto

DGEG – Direção Geral de Energia e Geologia

ETC – Coletor com tubos de vácuo

EU – União Europeia

FPC – Coletor plano

HCFC – Hidroclorofluorcarbonetos

HFC – Hidrofluorcarbonetos

IEA – International Energy Agency

INE – Instituto Nacional de Estatística

ISO – International Organization for Standardization

LiBr-H₂O – Par de trabalho Brometo de Lítio e água

NH₃ – Amoníaco

NH₃-H₂O – Par de trabalho Amoníaco água

PMV – Predicted Mean Vote

PPD – Predicted Percentage Dissatisfied

TEEH – Turbinas Eólicas de Eixo Horizontal

TEEV – Turbinas Eólicas de Eixo Vertical

WINEUR – Wind Energy Integration in the Urban Environment

Parâmetros e Variáveis

C – concentração de vapor de água [kg/m^3]

$C_{p_{ar}}$ – Calor específico do ar [$\text{kJ}/\text{kg}\cdot\text{K}$]

$C_{p_{IB}}$ – calor específico dos corpos interiores [$\text{kJ}/\text{kg}\cdot\text{K}$]

h – Entalpia [kJ]

h_e – Entalpia à entrada [J/kg]

h_s – Entalpia à saída [J/kg]

m_{ar} – massa do ar [kg]

m_{IB} – massa dos corpos interiores [kg]

\dot{m} – Caudal Mássico [kg/s]

\dot{m}_e – Caudal mássico de entrada [kg/s]

\dot{m}_g – vapor de água gerado no interior do compartimento [kg/s]

\dot{m}_{IB} – vapor de água trocado entre o ar e os corpos interiores [kg/s]

\dot{m}_{ij} – fluxo de vapor proveniente do espaço para outro compartimento [kg/s]

\dot{m}_{io} – fluxo de vapor de água no espaço interior, proveniente no exterior [kg/s]

\dot{m}_{ji} – fluxo de vapor proveniente de outro compartimento para o espaço [kg/s]

\dot{m}_{OB} – vapor de água trocado entre o ar e os corpos opacos [kg/s]

\dot{m}_{oi} – fluxo de vapor de água no exterior, proveniente do espaço interior [kg/s]

\dot{m}_s – Caudal mássico de saída [kg/s]

\dot{m}_{TB} – vapor de água trocado entre o ar e os corpos transparentes [kg/s]

Q_{abs} – Potência Calorífica do absorvedor [kW]

Q_{cond} – Potência Calorífica do condensador [kW]

Q_{evap} – Potência Calorífica do evaporador [kW]

Q_{gen} – Potência Calorífica do gerador [kW]

Q_{pre} – Potência Calorífica do pré-arrefecedor [kW]

Q_{ps} – Potência Calorífica do permutador [kW]

Q_{rect} – Potência Calorífica do retificador [kW]

Q_{frio} – calor rejeitado no evaporador do refrigerador [kW]

Q_{quente} – calor fornecida ao gerador para iniciar o processo [kW]

$Q_{rejeitado}$ – calor rejeitado, resultante da soma dos calores Q_{frio} e Q_{quente} [kW]

\dot{Q}_D – calor trocado por convecção entre o ar e o sistema de condutas [W/m^2]

\dot{Q}_G – calor gerado no espaço por sistemas AVAC, iluminação, equipamentos elétricos, etc [W/m²]

\dot{Q}_L – calor latente trocado entre o ar e as superfícies [W/m²]

\dot{Q}_O – calor gerado pelos ocupantes [W/m²]

$\dot{Q}_{IB_{ar}}$ – calor trocado por convecção entre ar e os espaços [W/m²]

$\dot{Q}_{OB_{ar}}$ – calor trocado entre o ar e os corpos opacos [W/m²]

$\dot{Q}_{TB_{ar}}$ – calor trocado entre o ar e os corpos transparentes [W/m²]

\dot{Q}_{Ri} – calor trocado por radiação no interior de um espaço entre as superfícies dos corpos interiores e outros [W/m²]

\dot{Q}_{RS} - calor gerado por radiação solar direta e difusa [W/m²]

\dot{Q}_V – calor associado ao sistema de ventilação [W/m²]

T_{ar} – temperatura do ar [°C]

T_{IB} – temperatura dos corpos interiores [°C]

t – tempo [s]

V – volume do espaço [m³]

W_b – Potência da Bomba [kW]

x – Fração Mássica de Amoníaco [kgNH₃/kg mistura]

x_e – Fração mássica de amoníaco à entrada [kgNH₃/kg mistura]

x_s – Fração mássica de amoníaco à saída [kgNH₃/kg mistura]

1. Estrutura e Organização da Dissertação

A presente dissertação encontra-se estruturada em 10 capítulos, no presente capítulo é definida a estrutura e organização do trabalho.

No segundo capítulo são estabelecidos os objetivos da dissertação.

O terceiro capítulo é dedicado à motivação da escolha do tema e enquadramento.

O quarto capítulo incide sobre a revisão bibliográfica efetuada, primeiramente é feita uma caracterização energética em Portugal, seguidamente apresentam-se as energias renováveis como forma de diminuir a dependência energética de combustíveis fósseis, incidindo particularmente nas energias solar e eólica. Neste capítulo é também abordado o conforto térmico e o papel que os sistemas de ar-condicionado têm na obtenção de conforto bem como o elevado consumo obtido pelos sistemas tradicionais acionados eletricamente, introduzindo-se posteriormente os sistemas de ar-condicionado solar por ciclo de absorção.

O capítulo cinco aborda o projeto da ASHRAE.

No sexto capítulo são descritos os modelos numéricos utilizados na dissertação.

No capítulo sete apresenta-se o caso de estudo solar e eólico.

O oitavo capítulo é dedicado à apresentação e análise dos resultados obtidos nas simulações laboratoriais e numéricas, solar e eólica.

No nono são feitas sugestão para aplicações futuras das tecnologias estudadas.

Por fim, no décimo capítulo são enumeradas as principais conclusões a retirar deste estudo e é apresentada a listagem de referências bibliográficas consultadas na elaboração da dissertação.

A dissertação inclui também um conjunto de anexos com informações complementares ao trabalho.

2. Objetivos

Esta dissertação, de carácter numérico teve como principal objetivo otimizar o consumo de energia, baseado unicamente em energias renováveis, num edifício de ensino no *campus* de Gambelas na Universidade do Algarve. Para cumprir este objetivo foram estabelecidos objetivos secundários, nomeadamente:

- i. Simular numericamente a geração de energia elétrica a ser consumida pelo edifício através da utilização de uma turbina eólica potenciada pela utilização de um sistema de direcionamento e aceleração do escoamento. Dentro deste objetivo pretendeu-se também estudar o potencial da utilização da energia produzida pela turbina pelo sistema elétrico e de iluminação do edifício.
- ii. Simular numericamente o nível de conforto térmico a que os ocupantes dos compartimentos estão sujeitos e prever do consumo de energia necessário para atingir esse conforto. Para tal pretendeu-se estudar a climatização dos espaços com recurso a energia solar térmica, nomeadamente:
 - A aplicação de coletores solares térmicos conectados a um sistema de ar-condicionado por ciclo de absorção, para arrefecimento em condições de verão;
 - A utilização de coletores térmicos de vácuo com a função de aquecer a água, que será distribuída pelo edifício através de um sistema de condutas e fornecerá calor ao interior dos compartimentos através de termoconvectores, em condições de inverno;
 - Comparar o desempenho do sistema de climatização que utiliza coletores e termoconvectores com o sistema de compressão a vapor (acionado eletricamente).

3. Motivação e enquadramento

Estudos feitos sobre a satisfação dos ocupantes de espaços interiores apontam a temperatura como um dos principais parâmetros a controlar para a obtenção de condições de conforto, sendo também o fator responsável pelas queixas mais frequentes (Frontczak & Wargocki, 2011). Nas últimas décadas têm-se verificado um aumento significativo do número de edifícios residenciais e de serviços que dispõem de sistemas ativos de controlo das condições ambientes interiores, em particular equipamentos de ar-condicionado. Torna-se necessário recorrer a estes sistemas quando a ventilação natural se mostra incapaz de fornecer condições de conforto térmico e qualidade do ar aos ocupantes que passam grande parte do seu tempo em espaços interiores (Klepeis *et al.*, 2001). O objetivo da utilização de sistemas de climatização ativos é a obtenção de melhores condições de conforto térmico e qualidade do ar interior. O conforto térmico é avaliado através do controlo de parâmetros como a temperatura, humidade e velocidade do ar. A qualidade do ar é monitorizadas através do controlo do caudal de renovação de ar, remoção ou diluição dos contaminantes (Perez–Lombard *et al.*, 2011). Contudo, a massificação da utilização de sistemas de ar-condicionado acionados eletricamente leva a que nos períodos de maior necessidade ocorram elevados consumos energéticos que contribuem para o consumo de combustíveis fósseis levantando questões energéticas e ambientais (Perez–Lombard *et al.*, 2008). Portanto, a obtenção de condições de conforto térmico deve englobar uma otimização do consumo energético por parte dos sistemas de climatização, isto é, deve-se proporcionar aos ocupantes um nível máximo de conforto associado ao menor custo energético possível.

É neste contexto que surge a necessidade de desenvolver sistemas de climatização alternativos aos tradicionais, ou seja, que permitam simultaneamente manter os níveis de conforto dos ocupantes e diminuir os consumos energéticos.

Portugal tem um grande potencial de aproveitamento das energias renováveis. Em particular, a energia solar está bastante disseminada no campo do aquecimento de águas sanitárias e produção de eletricidade, no entanto, ainda é pouco explorada na climatização de espaços. Os equipamentos de arrefecimento solar têm a capacidade de suprimir a maioria das exigências dos sistemas tradicionais de compressão de vapor, com a vantagem de a energia utilizada ser proveniente de uma fonte renovável.

Assim a utilização de um sistema de climatização baseado em ciclos de absorção alimentado por energia solar torna-se um conceito atrativo como potencial substituto dos sistemas convencionais acionados eletricamente.

A maior prevalência no mercado por parte dos sistemas convencionais de compressão de vapor em detrimento dos sistemas por ciclo de absorção não está relacionada com o desempenho dos sistemas mas sim com o custo de aquisição. Isto acontece porque ao contrário dos sistemas de compressão de vapor que são produzidos em série e as peças são produzidas em fábricas diferentes, os sistemas de ciclo de absorção com o par água-amoníaco são produzidas na mesma fábrica, peça a peça (IEA, 2010).

Paralelamente à adoção de medidas e aquisição de equipamentos que permitam reduzir o consumo energético do edifício, deve também ser equacionada a possibilidade de independência energética por parte do edifício, ou seja, a energia consumida pelo edifício ser produzida no local, através de fontes de energias renováveis, em vez do tradicional fornecimento pela rede elétrica nacional.

Atualmente existem, em Portugal, várias tecnologias comprovadamente viáveis na produção de energia elétrica através de fontes renováveis, como é o caso da energia fotovoltaica, hídrica e eólica. Das tecnologias anteriormente mencionadas, a mais madura e disseminada em termos de produção de energia integrada no edifício é, sem dúvida, a energia fotovoltaica. Alternativamente, nesta tese, será explorada a geração de energia para o sistema elétrico e de iluminação do edifício através de turbinas eólicas.

4. Revisão Bibliográfica

Este capítulo é dedicado à revisão bibliográfica efetuada. Nele é feita a caracterização energética de Portugal, evidenciando a dependência de importação de combustíveis fósseis. Posteriormente são abordadas as energias renováveis, particularmente a eólica de pequena dimensão e a solar térmica, que surgem como uma proposta de solução para produção de energia elétrica e para climatização dos espaços, respetivamente. Dentro do subcapítulo da energia eólica são abordados os aerogeradores existentes que podem ser aplicados em edifícios e sistemas de direcionamento do escoamento. No subcapítulo da energia solar são abordados de climatização ativos por ciclo de absorção com e sem bomba, nele é também evidenciada a necessidade de climatização nos espaços para melhoria do conforto dos ocupantes. Dentro do subcapítulo dos sistemas AVAC (Aquecimento, Ventilação e Ar-Condicionado) é dada particular atenção aos sistemas de ar-condicionado solar e são também introduzidas noções de conforto térmico e os modelos que o permitem avaliar.

4.1. Caracterização energética em Portugal

Nas últimas décadas tem-se verificado um aumento a nível mundial do consumo de energia e tornou-se evidente que o consumo de energia proveniente de combustíveis fósseis é insustentável em termos ambientais e económicos.

Portugal é um país com escassos recursos fósseis endógenos como o petróleo, o carvão e o gás natural, pelo que, em termos energéticos, se encontra dependente de importações para suprimir essas necessidades (Inverno & Lamarão, 2003). A dependência energética, quase exclusiva, de combustíveis de origem fóssil provenientes de mercados política e militarmente voláteis expõe a vulnerabilidade do país a flutuações de preço e a restrições de fornecimento. Dados da DGEG – Direção Geral de Energia e Geologia, (2015) indicam que na última década o volume de importações atingiu valores quatro vezes superiores aos da produção doméstica de energia.

No ano de 2013, Portugal encontrava-se entre os países da UE-28 com maior nível de dependência energética, sendo o sexto mais dependente, cerca de 20 pontos percentuais acima da média dos restantes membros da UE-28 (Eurostat, 2015).

Tornou-se então evidente a necessidade de encontrar formas alternativas para suprimir as necessidades energéticas do país através do aumento da produção doméstica. Assim

foi adotada uma política energética nacional, em linha com diretivas europeias, no sentido de atenuar a dependência energética dos combustíveis de origem fóssil, através da diversificação das fontes energéticas e do incentivo à geração de energia através de fontes renováveis endógenas e da delimitação de estratégias que conduzem a uma utilização mais racional e eficiente da energia.

No entanto, apesar da ainda elevada dependência energética do exterior, Portugal conseguiu nos últimos anos, através do investimento em energias renováveis e de medidas de eficiência energética, reduzir os valores registados em 2005 de 88,8% para 73,9% em 2013 (DGEG,2015).

A nível setorial, os edifícios (soma dos setores dos serviços, doméstico e indústria) são os maiores consumidores de energia (cerca de 61%). Assim torna-se evidente o grande potencial que os edifícios têm de contribuir para a redução do uso de energia primária, quer pela adoção de medidas de aumento da eficiência energética como através do recurso a energias renováveis (DGEG,2015).

4.2. Energias renováveis

O inevitável esgotamento dos combustíveis fósseis, bem como a poluição por eles gerada, levou a uma alteração do paradigma energético. Portugal tem feito um investimento crescente nas energias renováveis, motivado por uma aposta energética da política europeia nos recursos endógenos tendo em vista a diversificação das fontes, melhoria da segurança no abastecimento, redução da dependência energética e redução do impacto ambiental do setor de produção elétrica. Desde o ano 2000 as fontes de energia renováveis assumiram um papel relevante no panorama elétrico nacional, em consequência sobretudo do investimento em centrais eólicas e de pequenas hídricas.

Existem várias tecnologias capazes de transformar a energia proveniente de fontes renováveis em eletricidade. Serão aqui focadas apenas as que podem ser integradas num edifício e assim contribuir para a redução do seu consumo energético, mais especificamente, a eólica de pequena escala e a solar térmica direcionada para sistemas de ar-condicionado.

4.2.1. Energia eólica

O vento tem origem nas diferenças de pressão ao longo da superfície terrestre. As diferenças de pressão são causadas pela maior incidência da radiação solar sobre o

equador do que nos polos. Quando uma zona da superfície terrestre aquece ocorre uma diminuição da pressão e em consequência dá-se um movimento ascendente da massa de ar que se desloca das zonas de menor para as zonas de maior pressão.

A utilização primitiva da energia eólica centrava-se no seu aproveitamento através de moinhos de vento para moagem de cereais, bombagem de água ou na navegação marítima. Com o avanço tecnológico, surgiram as turbinas eólicas que utilizam a energia cinética proveniente da rotação das pás convertendo a energia eólica em energia elétrica.

Nos últimos 15 anos, a energia eólica tem vindo a ganhar destaque no panorama elétrico nacional, apesar de ser uma energia intermitente. Em 2014 a contribuição da energia eólica foi de aproximadamente 1/4 do total de 63% de energia renovável (DGEG, 2015).

4.2.1.1. Modo de funcionamento

Uma turbina eólica de pequena escala opera de forma semelhante a uma turbina de grandes dimensões. A conversão de energia em eletricidade é acionada pela energia do vento (energia cinética) que faz girar as hélices de uma turbina que por sua vez irá pôr em funcionamento um gerador. A quantidade de energia gerada pela turbina está diretamente relacionada com a intensidade e direção do escoamento, esta informação é adquirida por um anemómetro e transferida para um comando que transmite ao motor de controlo de direção de forma a alinhar o rotor com a direção predominante do vento. A engrenagem é o sistema que converte a rotação de baixa velocidade do rotor em rotação de alta velocidade através do eixo conectado ao gerador que produz eletricidade (figura 4.1) (Jha, 2010). A energia elétrica produzida é então introduzida na rede de distribuição nacional e por fim disponibilizada aos consumidores.

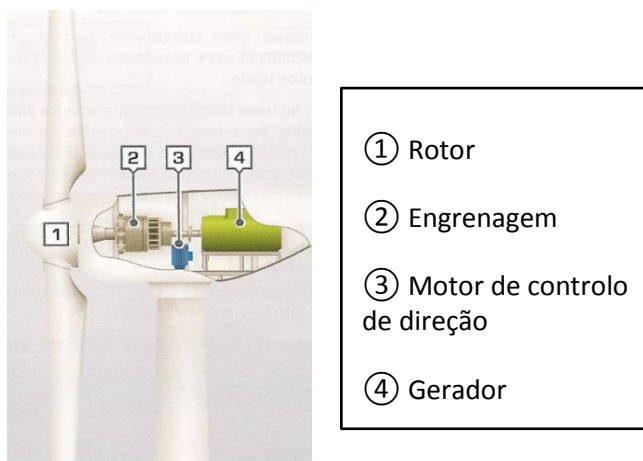


Figura 4.1: Componentes de uma turbina eólica.

[Fonte: 2E, (2015)]

Por norma, as turbinas eólicas instalam-se em zonas onde a média anual da velocidade do vento é superior a 6 m/s. Em Portugal verificam-se esta velocidade em zonas de orografia elevada e expostas, junto à linha da costa (*onshore*) ou em alto mar (*offshore*).

4.2.1.2. Turbinas de pequena escala

Hoje em dia a energia eólica é convertida em eletricidade usando turbinas eólicas de grandes dimensões em parques eólicos localizados ao largo da costa ou em terra em locais expostos, onde as características do vento são mais favoráveis à geração de energia.

No entanto, existe uma forte oposição aos parques eólicos existentes argumentando que as turbinas eólicas estão associadas a um elevado nível de ruído, provocam um impacto visual considerável e têm um impacto negativo sobre as aves locais. Assim, há um interesse crescente instalação de turbinas eólicas geração de eletricidade em ambiente urbano, estando disponível onde é necessária e evitando o impacto paisagístico uma vez que podem ser integradas na arquitetura dos edifícios ou projetadas para zonas com correntes (ver figura 4.2).

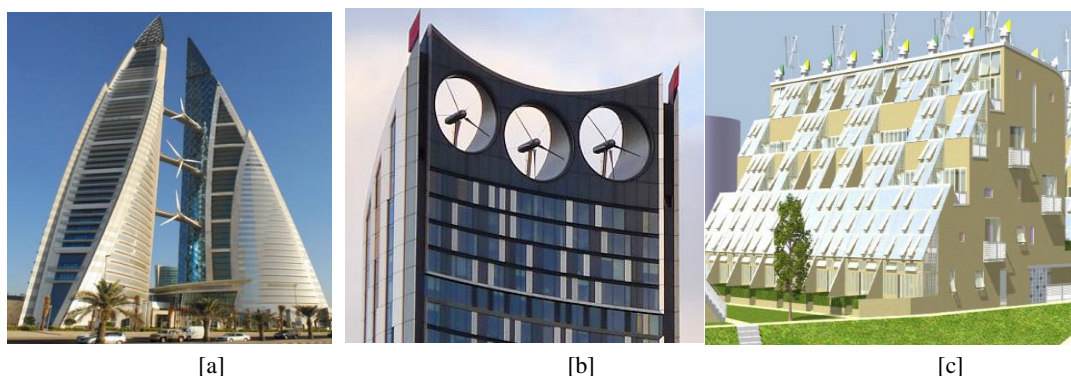


Figura 4.2:[a] Torres do *World Trade Center* no Bahrain. [b] Torre Strata em Londres. [c] Aerodinamismo de um edifício residencial.

[Fontes:

[a] <http://www.atkinsglobal.com/en-gb/media-centre/multimedia-library/image-gallery>

[b] <http://www.urban75.org/blog/the-rarely-spinning-turbines-of-the-strata-tower-south-london/>

[c] WINEUR (2007)]

Na figura 4.2a estão representadas as Torres do *World Trade Center* no Bahrain, que foram as primeiras a integrar turbinas eólicas num edifício. As três turbinas de 29 metros de diâmetros são suportadas por pontes que conectam os dois edifícios. A estrutura das torres, em forma de asa, direciona e acelera o escoamento para as turbinas e simultaneamente elimina a turbulência. Estima-se que no conjunto as três turbinas

produzam cerca de 35% das necessidades energéticas do edifício e que esta estrutura seja 25% mais eficiente que uma turbina isolada.

A figura 4.2b ilustra o edifício Strata em Londres onde estão integradas três turbinas eólicas de nove metros de diâmetro com capacidade de 19 kW cada. Prevê-se que cada turbina produza pelo menos 50MW.h de eletricidade por ano, o correspondente a 8% do consumo energético estimado do edifício.

A figura 4.2c mostra que um edifício ou um telhado inclinado alinhado com a direção predominante do vento pode potenciar o rendimento energético das turbinas a urbanas.

Embora existam vários critérios de classificação das turbinas eólicas qualquer aerogerador existente enquadra-se numa de duas categorias, dependendo do seu eixo de rotação. Estas podem ser turbinas eólicas de eixo horizontal (TEEH) ou turbinas eólicas de eixo vertical (TEEV). De acordo com Smith (2005), as TEEH com duas ou três pás são o tipo de aerogerador mais disseminado comparativamente com os de eixo vertical, no entanto o autor refere que as turbinas de eixo vertical são mais adequados para a instalação em ambiente urbano, uma vez que estão associadas a um menor nível de ruído e a produção de eletricidade não depende da direção do vento.

4.2.1.3.Fatores que influenciam o vento urbano

As limitações do aproveitamento da energia eólica para produção elétrica estão relacionadas com a variabilidade do vento em relação à intensidade e direção. A sua intensidade não é regular e a sua disponibilidade está dependente do local. Em ambiente urbano existem edifícios, árvores, barreiras de som e outros obstáculos que influenciam a direção do fluxo de vento. De acordo com WINEUR (2007) as principais características do vento urbano são a baixa velocidade media anual (quando comparado com as zonas rurais) e o regime turbulento, no entanto, estas zonas variam de acordo com a disposição dos edifícios e dos obstáculos na envolvente.

Em ambiente urbano existem zonas de turbulência que devem ser identificadas e evitadas. Regra geral, ao elevar as turbinas a um nível duas vezes superior à altura do obstáculo mais alto consegue-se evitar estas zonas e uma perda significativa de potencial. Há também casos em os edifícios ou obstáculos podem ser utilizados para acelerar o escoamento, como ficou evidenciado na figura 4.2, no entanto o planeamento urbano não tem estes aspetos em consideração e a maioria das áreas urbanas tem espaçamentos de

poucos metros e regimes de vento inconstantes. Na figura 4.3 verifica-se que turbina A se encontra a uma altura baixa e ainda assim evita a região turbulenta. A turbina B evita igualmente a zona de turbulência ao ser instalada no topo do edifício. A turbina C ao ser montada a uma altura duas vezes superior ao obstáculo mais próximo evita a zona de turbulência. A turbina D ao ser posicionada numa zona muito superior, não só fica afastada da zona de turbulência, como é exposta a grandes velocidades de vento características de zonas elevadas.

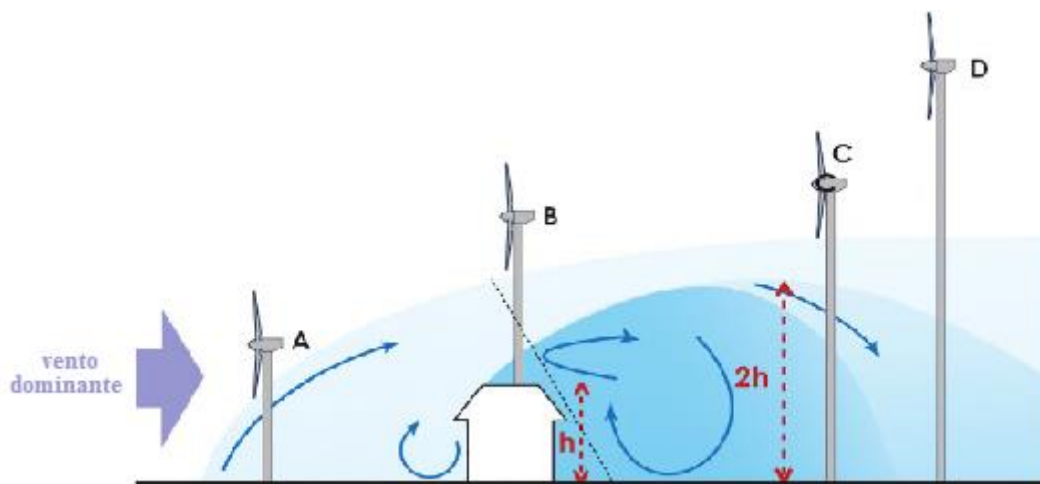


Figura 4.3. Localizações das turbinas de forma a evitar a zona de turbulência.

[Fonte: Stankovic, *et al.*, (2009)]

4.2.1.4. Sistemas de direcionamento, aceleração e concentração do vento

Atualmente existe um baixo número de edifícios que possuem turbinas eólicas integradas. Ledo *et al.* (2011) aponta várias razões que justificam estes números, entre os quais estão a baixa intensidade do vento local, altos níveis de turbulência, imprevisibilidade do vento em termos de velocidade e direção, a presença de edifícios e outros obstáculos.

Como foi mencionado anteriormente, regra geral, em ambiente urbano, uma turbina eólica deve-se localizar a duas vezes a altura do obstáculo mais alto para evitar uma quebra no desempenho. No entanto é importante ressaltar que existem zonas em redor dos edifícios com características de direcionar, acelerar e concentrar o escoamento, tal como tneis, que podem ser utilizados para instalar uma turbina eólica. O próprio edifício pode ser construído de forma a que a sua própria estrutura potencie o aproveitamento eólico (figura 4.4).

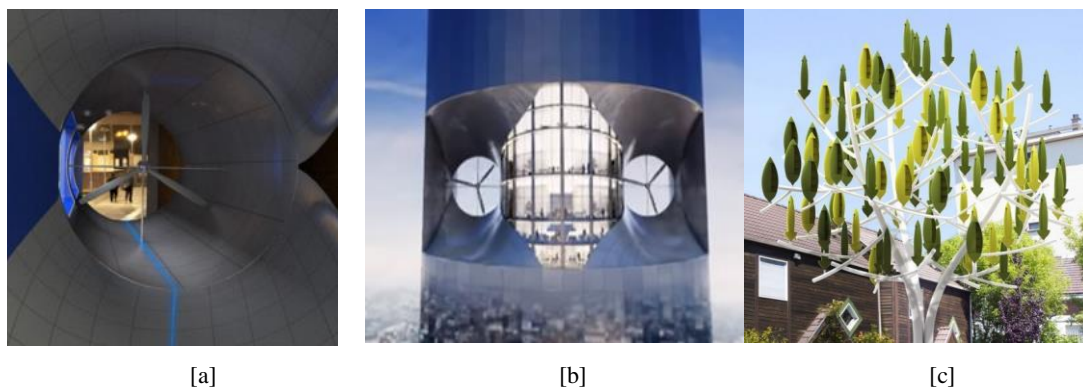


Figura 4.4:[a] Projeto PUMBA na Praça du Bastion [b] Projeto PUMBA Amaay [c] Turbina eólica em forma de árvore

[Fontes:

[a] [b] Amaay ,(2014)

[c] <http://award.designtoimprovelife.dk/nomination/47>]

A figura 4.4a mostra um túnel de vento que atravessa a Torre Madou na Praça du Bastion em Bruxelas. Este túnel permitirá que sejam feitos estudos sobre o comportamento do escoamento e aferir se as turbinas poderão ser integradas no edifício.

A figura 4.4b representa o projeto de instalação de duas turbinas eólicas de eixo vertical na torre das Finanças em Bruxelas de forma a tirar partido do forte regime de ventos sentido na região.

Na figura 4.4c mostra-se um dispositivo em forma de árvore composto por várias turbinas eólicas de pequena dimensão e assim introduzir a energia eólica em ambiente urbano de uma forma esteticamente apelativa ao público. Este dispositivo foi dimensionado para utilizar o escoamento, que passa nas ruas em torno dos edifícios, ao nível das árvores.

4.2.2. Energia solar

A energia solar constitui uma fonte inesgotável de energia não poluente com potencial de expansão a nível mundial, apresentando-se como um substituto altamente viável aos combustíveis fósseis. A sua distribuição varia principalmente em função da latitude, apresentando maiores valores nas zonas equatoriais. Em termos quantitativos a radiação incidente na superfície terrestre ao longo do ano é cerca de duas mil vezes superior às necessidades energéticas mundiais. Esta energia é particularmente apropriada para aplicação em edifícios, podendo ser aproveitada indiretamente através de sistemas fotovoltaicos para produção de eletricidade ou diretamente com finalidades térmicas

através de dois sistemas: o solar ativo e o solar passivo. Neste trabalho será apenas focado nos sistemas solares ativos.

4.2.2.1. Coletores solares térmicos

Um coletor solar consiste num permutador de calor que absorve radiação solar de onda-curta, converte-a em calor e transfere-o para um fluido que circula no circuito. A radiação é absorvida numa placa absorvedora onde estão incorporados tubos que fazem a transferência do calor gerado para um fluido. O fluido transporta a energia adquirida diretamente para água quente, para um equipamento de ar-condicionado, ou para um depósito onde fica armazenado (Kalogirou, 2004).

Basicamente existem dois tipos de coletor solar: os concentradores e os não-concentradores. Num coletor não-concentrador a área de interseção é igual à área de absorção solar. Este tipo de coletores são estacionários, uma vez que, se encontram numa posição fixa e não seguem o movimento do sol ao longo do dia. Pelo contrário, um coletor solar concentrador tem superfícies concavas refletoras que interceptam e direcionam a radiação para uma área receptora mais pequena e assim aumentam o fluxo de radiação (Kalogirou, 2004). Dentro deste tema serão apenas desenvolvidos três tipos de coletores solares não-concentradores (tabela 4.1).

Tabela 4.1: Coletores solares não-concentradores

Movimento	Tipo de coletor	Sigla	Tipo de absorvedora	Temperaturas (°C)
Estacionário	Coletor plano <i>(do inglês: Flat Plate Collector)</i>	FPC	Plano	30 – 80
	Coletor de Vácuo <i>(do inglês: Evacuated Tube Collector)</i>	ETC	Plano	50 – 200
	Coletor Parabólico Composto <i>(do inglês: Compound Parabolic Collector)</i>	CPC	Tubular	60 – 240

Fonte: [(Kalogirou, 2004)]

4.2.2.2. Coletores Planos

Os coletores solares planos possuem uma cobertura transparente na parte superior e estão termicamente isolados na parte inferior e nas laterais, com o objetivo de maximizar a absorção da radiação e a conversão da radiação em calor e minimizar as perdas de calor por condução ao longo da sua transferência pelo sistema (GREENPRO, 2004). A cobertura transparente é utilizada para reduzir as perdas por convecção a partir da placa através do absorvedor de uma vez que atua como uma estufa retendo a camada de ar estagnado entre a placa absorvente e o vidro (Kalogirou, 2004). Na parte lateral existem ainda dois tubos um de alimentação e outro de retorno do fluido.

O processo consiste na incidência de radiação solar na cobertura transparente do coletor solar e absorção por parte de uma superfície negra com alta capacidade de absorção. Grande parte da energia absorvida pela placa é, em seguida, transferida para o fluido de transporte, através de um sistema de tubagem, e conduzida até ao local onde será utilizada ou armazenada (Kalogirou, 2004).

Este tipo de coletor é de posição fixa, ou seja, não acompanha o movimento do sol ao longo do dia, devendo por isso ser orientado diretamente para o equador, isto é, posicionado no sentido sul no hemisfério norte e para norte, no hemisfério sul.

4.2.2.3. Coletores Compostos Parabólicos

Os coletores solares compostos parabólicos têm o formato de duas parábolas parciais simétricas espelhadas frente-a-frente (figura 4.5), adquirindo assim a capacidade de refletir grande parte da radiação proveniente de vários ângulos para o absorvedor, sem que haja necessidade de alinhar o coletor solar com o posicionamento do sol (Pereira, 1985). Um CPC pode ser orientado com o eixo no sentido Norte-Sul ou Este-Oeste, devendo a sua abertura estar direcionada para o equador com um ângulo de inclinação correspondente à latitude da sua localização (Kalogirou, 2004). Estes coletores têm, por norma, uma camada de vidro protetora, de forma a evitar que alguma sujidade entre no coletor e reduza a refletividade das paredes (Kalogirou, 2004).

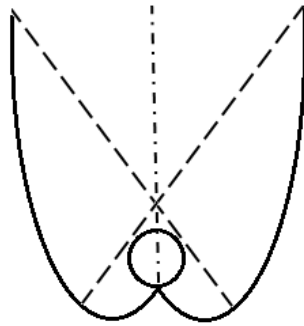


Figura 4.5: Representação de um coletor composto parabólico.

4.2.2.4. Coletores de Vácuo

Os coletores solares com tubos de vácuo operam de forma diferente dos outros tipos de coletores. Este tipo de coletor solar consiste num tubo inserido no interior de um tubo selado a vácuo, como mostra a figura 4.6.

À semelhança dos coletores planos, os coletores a vácuo têm capacidade absorver tanto radiação direta como difusa, incidindo de vários ângulos, sendo no entanto mais eficientes graças à camada de vácuo que permite atingir temperaturas mais elevadas uma vez que diminui significativamente as perdas por condução e por convecção.

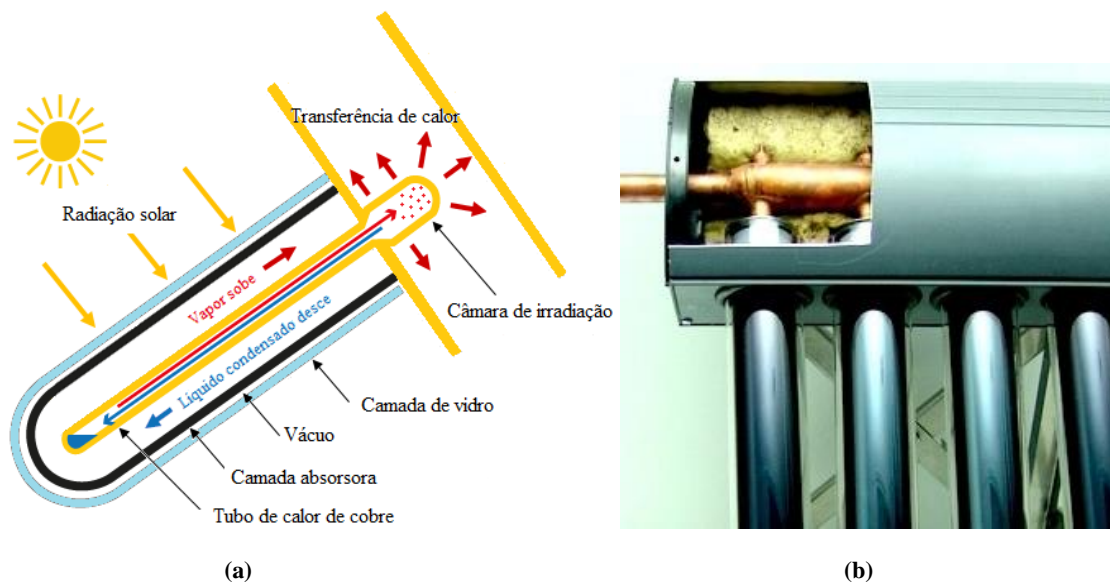


Figura 4.6: (a) Esquema ilustrativo de um coletor solar a vácuo. (b) Interior de um coletor solar com tubos de vácuo.

[Fonte: (b) <http://www.simplesolar.ca/blog/flat-plate-collectors-vs-evacuated-tube-collectors>]

Os coletores solares com tubos de vácuo utilizam a transferência de calor durante a mudança de estado líquido para vapor de forma altamente eficiente. No interior do coletor

encontra-se um tubo constituído por metais com condução elevada (por norma, cobre) e em torno deste tubo encontra-se uma camada de vácuo.

A radiação solar ao passar pela camada de vidro incide sobre a camada negra absorvedora que aquece, ao aquecer o líquido com elevado coeficiente de transferência de calor, que se encontra no interior do tubo de calor, começa a entrar em ebulição e ascende até à câmara de irradiação (figura 4.6a) onde troca calor com a água que circula no tubo (termicamente isolado) no topo do coletor (figura 4.6b). Ao ceder calor o líquido, agora ligeiramente mais frio, torna a condensar e desloca-se em direção à parte inferior do tubo por ação da gravidade onde será novamente aquecido e dará continuidade ao ciclo.

Ao atingir temperaturas de operação elevadas, o coletor perde mais calor para o ambiente e cede menos calor ao fluído. Por outro lado, os compressores térmicos trabalham mais eficientemente a temperaturas mais elevadas (Kim & Ferreira, 2008).

4.2.2.5. Coletores

Os coletores podem ser montados tanto em paralelo como em série. A instalação dos coletores em série causa um aumento da temperatura ao passo que a montagem em paralelo resulta num aumento do caudal. A instalação em série é simples e tem um menor custo de instalação, no entanto, está associada a um menor rendimento e maiores perdas de carga. Por oposição, a montagem em paralelo, apesar de ser de instalação mais complexa e estar associada a maiores custos, diminui as perdas de carga e consequentemente permite a obtenção de maiores rendimentos.

A literatura recomenda que, no hemisfério norte, os coletores solares sejam, idealmente, orientados para sul, uma vez que é a direção que favorece uma maior incidência de radiação solar ao longo do dia.

A altura a que o sol se encontra na esfera celeste varia conforme as estações do ano sendo maior no verão e diminuído progressivamente até ao inverno. Com a variação da altura a que o sol se encontra na esfera celeste varia também a inclinação com que os raios solares incidem no solo. No verão os raios solares incidem perpendicularmente ao solo fazendo com que a energia que nele incide seja distribuída sobre uma área menor produzindo um maior aquecimento. No inverno, quando os raios solares incidem com uma elevada inclinação face à linha perpendicular ao solo a sua energia é distribuída por uma área maior resultando num menor aquecimento. Assim o ângulo de inclinação ideal

do painel solar dependerá da latitude geográfica do local de instalação e poderá também variar consoante a estação do ano (ajustando a inclinação ao ângulo de incidência dos raios solares), normalmente apenas verão e inverno, alternativamente poderá ser estabelecido um ângulo intermédio estático ao longo do ano.

A tabela 4.2 mostra a variação do ângulo de inclinação ideal do coletor aplicado às cidades do Porto, Lisboa e Faro.

Tabela 4.2: Variação do ângulo de inclinação ideal do coletor solar aplicado às cidades do Porto, Lisboa e Faro.

Cidades	Latitude	Verão	Inverno	Todo o ano
		Latitude - 15°	Latitude + 15°	Latitude - 5°
Porto	41,14	26°	56°	36°
Lisboa	38,71	24°	54°	34°
Faro	37,02	22°	52°	32

Outro aspeto importante a ter em consideração aquando da montagem de coletores solares é a questão dos sombreamentos (atuais e futuros) que podem provir de prédios, árvores ou até de outros coletores caso sejam instaladas fileiras. Neste último caso, existe uma distância mínima (figura 4.7) entre coletores, apresentada na tabela 4.3, assumindo a utilização de coletores com 2 metros de comprimento e a utilização dos ângulos ideais apresentados anteriormente na tabela 4.2.

Tabela 4.3: Distância mínima entre fileiras de coletores, nas cidades do Porto, Lisboa e Faro.

Cidades	Latitude	Verão	Inverno	Todo o ano
Porto	41,14	2,6	4,6	4,1
Lisboa	38,71	2,5	4,3	3,8
Faro	37,02	2,4	4,1	3,6

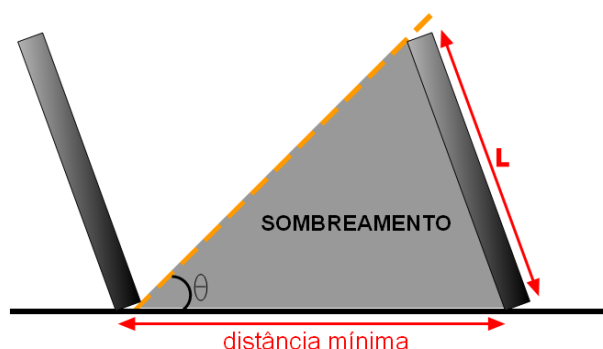


Figura 4.7: Distância mínima entre fileiras de coletores solares.

4.2.3. Conforto Térmico

A sociedade passa grande parte do seu tempo em espaços interiores com elevada densidade ocupacional (Klepeis *et al.*, 2001). Torna-se assim fundamental que estes espaços ofereçam níveis adequados de conforto térmico aos seus ocupantes.

Vários estudos avaliaram a percepção que os ocupantes de espaços edificados têm relativamente ao ambiente interior e às condições por eles consideradas como confortáveis. Através desses estudos foram identificados parâmetros físicos e químicos que influenciam o conforto de ocupantes de espaços interiores. A partir destes parâmetros foram desenvolvidos índices e normas *standard*, como a *International Organization for Standardization* (ISO) 7730 (2005), para as condições existentes em espaços interiores onde são definidos intervalos de aceitabilidade para o conforto dos ocupantes.

Definição

A ISO 7730 (2005) é uma norma internacional utilizada para determinar as condições térmicas em espaços interiores. Esta norma define o conforto térmico com sendo “*um estado de espírito no qual a pessoa sente satisfação com o ambiente térmico*”. A neutralidade térmica corporal, ausência da sensação de calor ou frio, está estritamente relacionado com o conforto térmico. O conforto térmico é um conceito complexo resultante da combinação de vários fatores que afetam a percepção térmica humana e, por isso, varia até entre pessoas que ocupam o mesmo espaço. A sensação térmica está fortemente relacionada com o balanço da temperatura corporal, que por sua vez é influenciada por parâmetros físicos, que caracterizam o meio envolvente, e parâmetros pessoais, que são características particulares de cada ocupante (é nestes parâmetros que se baseia o modelo do PMV (*Predicted Mean Vote*) e encontram-se discriminados mais pormenorizados no respetivo subcapítulo). No entanto, o conforto térmico não depende apenas de fatores quantificáveis, como os anteriormente mencionados, mas também de fatores não quantificáveis tais como o estado psicológico, os hábitos, a educação, entre outros. Assim, a sensação de conforto varia conforme a adaptação particular do ocupante a determinado ambiente (Khedari *et al.*, 2000). A norma ISO 7730 (2005) tem como base um modelo de conforto térmico estacionário, pressupondo que a resposta fisiológica e psicológica dos ocupantes é constante ao longo de todo o ano, e que variação de temperaturas preferidas deriva da adaptação do vestuário às estações do ano.

Regra geral, as normas dividem as categorias de conforto de acordo com as estações: inverno (estação fria) e verão (estação quente) e estabelecem parâmetros como os apresentados na tabela 4.4, com os quais é possível satisfazer 90% dos ocupantes com atividades maioritariamente sedentárias, nas respetivas estações (Centnerova & Hensen, 2001).

Tabela 4.4: Temperaturas recomendadas de forma a garantir a satisfação térmica de 90% dos ocupantes com atividade física reduzida.

Estação	Vestuário (clo)	Metabolismo (met)	Intervalo de temperatura (°C)	Temperatura ideal (°C)
Inverno	1	1,2	20-24	22
Verão	0,5	1,2	23-26	24,5

[Fonte: Centnerova & Hensen (2001)]

4.2.4. Predicted Mean Vote (PMV)

O modelo do PMV (*Predicted Mean Vote*) combina quatro variáveis físicas (temperatura do ar [°C], temperatura média radiante [°C], velocidade do ar [m/s] e humidade relativa [%]) e duas variáveis pessoais (vestuário [clo] e nível de atividade metabólica [met]) num índice usado para prever o conforto térmico corporal. Sendo (Fanger, 1970):

- Temperatura do ar – temperatura do ar em torno do ocupante;
- Temperatura média radiante – média ponderada das temperaturas das superfícies em redor do ocupante;
- Velocidade do ar – deslocação do escoamento em termos de distância percorrida em função do tempo;
- Humidade relativa – percentagem de vapor de água presente no ar;
- Vestuário – camadas de isolamento térmico usadas pelo ocupante que conferem menor transferência de calor entre o corpo e o ambiente envolvente;
- Nível de atividade metabólica – energia gerada pelo corpo humano, que varia de indivíduo para indivíduo, e depende principalmente do género, idade, peso e nível de atividade física.

O índice PMV corresponde à média da sensação térmica sentida pelos ocupantes expostos às mesmas condições num espaço. Para avaliar a sensação térmica é utilizada uma escala de sete níveis simétrica em torno de (0), onde são atribuídos valores entre (-

3) e (+3) de acordo com o balanço térmico corporal, sendo (0) o valor ideal representando a neutralidade térmica (figura 4.5).

Tabela 4.5: Escala de sete pontos relativa à sensação térmica corporal.

- 3 muito frio	- 2 frio	- 1 ligeiramente frio	0 neutro	+ 1 ligeiramente quente	+ 2 quente	+3 muito quente
----------------------	-------------	-----------------------------	-------------	-------------------------------	---------------	-----------------------

[Fonte: ISO 7730 (2005)]

4.2.5. Predicted Percentage Dissatisfied (PPD)

O PPD (*Predicted Percentage Dissatisfied*) representa a percentagem de ocupantes insatisfeitos com a temperatura do ambiente interior, englobando quer os indivíduos que sentem desconforto por frio quer por calor. Este índice é determinado em função do PMV, quanto mais afastado de (0) estiver o PMV maior será a percentagem de ocupantes insatisfeitos. A figura 4.8 consiste na representação gráfica da relação ambos os índices.

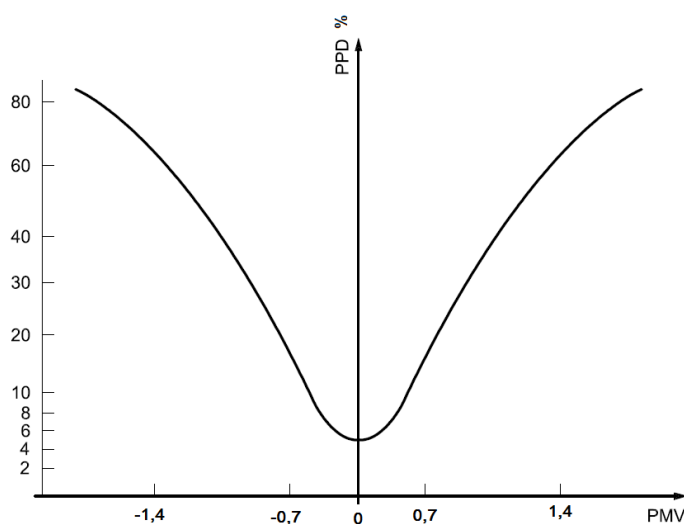


Figura 4.8 : PPD em função do PMV.

[Fonte: ISO 7730 (2005)]

A norma ISO 7730 (2005) classificou o ambiente térmico em três categorias: A, B e C, em função dos índices de PMV e PPD (tabela 4.6).

Tabela 4.6: Categorias do ambiente térmico.

Categoria	Sensação térmica	
	PMV	PPD (%)
A	-0,2 < PMV < +0,2	<6
B	-0,5 < PMV < +0,5	<10
C	-0,7 < PMV < +0,7	<15

[Fonte: ISO 7730 (2005)]

A percentagem máxima de ocupantes insatisfeitos com as condições do espaço é 100%. Contrariamente, é impossível garantir a satisfação de todos os ocupantes, mesmo que as condições padrão estejam a ser aplicadas. A norma ISO 7730 (2005) refere que os intervalos de temperatura devem garantir a satisfação térmica de pelo menos 80% dos ocupantes do espaço.

4.2.6. Ventilação

A ventilação é definida como o processo de renovação do ar, num dado espaço, por meios naturais ou mecânicos (Decreto-Lei nº 79/06, 2006). A taxa de renovação de ar num edifício é identificado como um parâmetro de conforto. Os ocupantes, os equipamentos introduzem poluentes químicos num espaço ocupado, portanto torna-se necessário adicionar ar exterior limpo de forma a remover ou diluir os contaminantes até níveis aceitáveis. O inconveniente associado à utilização de ar exterior durante os períodos de verão e inverno, são os custos adicionais provenientes das operações de filtração, controlo da temperatura e humidade e de distribuição do ar (APA, 2009). O excesso de ventilação pode no entanto, causar desconforto por arrefecimento em algumas partes do corpo humano (Daisey *et al.*, 2003).

Em espaços interiores a presença de dióxido de carbono é principalmente gerada através no metabolismo humano. A concentração deste gás varia conforme o tempo e a taxa de ocupação ao longo do dia. A concentração de dióxido de carbono do ar interior de compartimento em avaliação pode ser um bom indicador da taxa de ventilação. Assume-se que se o sistema de AVAC não está a remover eficientemente o dióxido de carbono, então os outros poluentes interiores estão provavelmente a acumular-se na mesma proporção (APA, 2009).

O Decreto-Lei nº 79/06, de 4 de Abril 2006, estabelece o limite máximo para a concentração do dióxido de carbono permitida em espaços interiores de 1000ppm ou 1800 mg/m³. A taxa mínima de ventilação para garantir uma qualidade do ar interior é de 10 L/s por ocupante, resultando numa concentração de CO₂ de aproximadamente 850 ppm, em condições de estado estacionário (APA, 2009).

A determinação da ventilação a aplicar num determinado espaço pode ser efetuada em função do número ocupantes do compartimento através da equação 4.1:

$$Ventilação(m^3/s) = \frac{n^{\circ}ocupantes \times taxa \ de \ ventilação \ (L/s)}{1000(L/m^3)} \quad (4.1)$$

4.2.7. Estudos efetuados em estabelecimentos de ensino

Em países desenvolvidos a população jovem passa uma percentagem significativa do seu tempo em edifícios escolares. Os estabelecimentos de ensino enquadram-se numa categoria de edifícios onde são requeridos elevados níveis conforto térmico, uma vez que, um ambiente termicamente insatisfatório influencia negativamente os níveis de atenção, concentração, aprendizagem e desempenho dos ocupantes.

Uma área que requer maior investigação e investimento é a criação de condições térmicas e de ventilação em salas de aula. Existem ainda muitas salas de aula que não possuem nenhum sistema de climatização ativa, sendo a climatização/ventilação efetuada exclusivamente através de portas e janelas (Godwin & Batterman, 2007).

Vários autores avaliaram o papel do conforto térmico em estabelecimentos de ensino. Em Conceição *et al.* (2015) foi desenvolvido um *software* que simula a resposta térmica de um edifício universitário permitindo obter dados experimentais relativos ao conforto térmico e qualidade do ar em espaços interiores, recorreram a questionários durante as estações de outono, inverno e primavera, para inquirir sobre a sensação térmica em salas de aula em 110 espaços do edifício de ensino.

Autores como Buratti & Ricciardi (2009), Corgnati *et al.* (2009), Pereira *et al.* (2014), Pereira *et al.* (2015) e Wong & Khoo (2003) estudaram o conforto térmico em espaços interiores através de uma análise comparativa de questionários e medições dos parâmetros térmicos do ar feitas em salas de aula; os questionários pretenderam avaliar a sensação térmica dos ocupantes que, por ser variável de pessoa para pessoa, se torna subjetiva quando comparada com medições físicas do meio envolvente.

Em Kameda *et al.* (2007) é avaliado o efeito que a alteração de parâmetros da qualidade do ar e do ambiente térmico têm nos níveis de produtividade e desempenho de professores e alunos em sala de aula.

Ito *et al.* (2006) verificou uma melhoria no aproveitamento escolar dos estudantes em ambientes com elevadas taxas de renovação do ar ambiente.

Estudos efetuados por Heschong (2003), Fraga *et al.*(2008), Shaughnessy *et al.*(2006), Kosonen & Tan (2004) e Lackney (2001) mostram que vários docentes consideram que as condições térmicas existentes no espaço influenciam o processo de aprendizagem dos estudantes e o seu próprio desempenho.

Lee *et al.* (2012) e Mendell & Heath (2005) demonstraram a forte correlação entre o número de queixas com as condições do ar interior (baixas taxas de ventilação, excesso de humidade, poluentes, entre outros) e a saúde e performance dos ocupantes

. No seu estudo Wargocki *et al.* (2005) utilizaram uma amostra de cerca de 100 alunos e fizeram variar as condições de ventilação e de temperatura. Verificaram que alterar o caudal de ventilação entre 3 e 9,5 l/s por ocupante resultava em melhorias de performance situadas entre 8 e 14%. Verificaram também que ao reduzir a temperatura de 24-25°C até aos 20°C resultava numa diminuição da performance entre 2 a 4% por cada grau.

Em Conceição & Lúcio (2008) foi aplicado um *software* que permitiu avaliar a qualidade do ar interior e o nível de conforto térmico dos ocupantes de um edifício escolar no Algarve, em condições de inverno e em regime estacionário e transitório. O modelo numérico simulou a utilização de três painéis solares instalados no telhado do edifício para aquecer os compartimentos onde se verificou desconforto por frio. Este sistema permitiu simultaneamente fornecer conforto térmico aos ocupantes, com níveis reduzidos de consumo energia por parte do edifício. Para controlo da qualidade térmica foi utilizado o índice de Votação Média Previsível (PMV).

4.2.8. Consumos energéticos em estabelecimentos de ensino

Quando um espaço apresenta condições de conforto térmico ideais, aumenta a probabilidade dos ocupantes se sentirem termicamente confortáveis. No entanto, quando os ocupantes estão insatisfeitos com as condições térmicas do espaço recorrem, por norma, a aparelhos que condicionam o ar interior, introduzindo ou removendo cargas térmicas que anulam a sensação de frio ou calor. Assim a necessidades de conforto térmico dos ocupantes é um fator determinante no consumo energético do edifício e por isso tem um papel importante na sua própria sustentabilidade.

Os sistemas de ar-condicionado estão associados a elevados consumos de energia durante períodos prolongados, para fins de aquecimento mas particularmente para arrefecimento. Além disso, as taxas de fluxo de ar são substancialmente maiores do que

com sistemas de ventilação mecânicos simples, exigindo elevadas frações de energia. Por norma, o consumo de uma fração adicional de energia não se reflete num aumento proporcional dos níveis de conforto Smith (2005).

A nível da EU-28 os estabelecimentos de ensino encontram-se entre os edifícios de serviços mais consumidores de energia (12%) apenas superados pelo comércio (28%) e pelos escritórios (26%) (Economidou *et al.*, 2011).

Segundo dados do INE, no ano de 2014 existiam um total de 9177 estabelecimentos de ensino em Portugal continental, dentro dos quais 286 destinavam-se apenas ao ensino superior, público e privado (INE, 2015a; INE.2015b) Os estabelecimentos de ensino representam uma fração significativa no parque edificado nacional tendo assim uma elevada quota no consumo energético final. Os consumos energéticos são a segunda maior despesa dos estabelecimentos de ensino a seguir aos salários. Dentro dos consumos energéticos, a maior fração, cerca de 66% da energia, é utilizada em sistemas de aquecimento, arrefecimento e ventilação dos espaços (Pereira *et al.*, 2014).

Estudos feitos por Sekki *et al.* (2015a) mostram que estabelecimentos de ensino mais recentes efetuam menores consumos energéticos para fins de climatização dos espaços interiores do que estabelecimentos mais antigos.

Em Sekki *et al.* (2015b) é demonstrada a variação do consumo energético em estabelecimentos de ensino, na procura de condições de conforto térmico, em função da faixa etária dos ocupantes.

Nguyen & Aiello (2013) estudaram a forma como o número de ocupantes e o seu comportamento influencia a utilização sistemas de climatização e o consumo energético.

Dall'O' & Sarto (2013) analisaram os consumos energéticos para climatização dos espaços, o comportamento dos ocupantes e as características térmicas de 49 estabelecimentos de ensino.

Thewes *et al.* (2014) investigaram os consumos de eletricidade e dos sistemas de climatização de 68 estabelecimentos de ensino.

Pereira *et al.* (2015) refere que os estabelecimentos de ensino em Portugal, de modo geral, apresentam consumos anuais por m² relativamente baixos, não querendo isto

significar que estes estabelecimentos são eficientes energeticamente, mas sim que os baixos consumos são reflexo principalmente da inexistência em sala de aula de sistemas que promovem condições de conforto nas salas de aula.

Os consumos elevados por parte do edifício são consequência de dois fatores principais, nomeadamente, o uso intensivo de equipamentos (iluminação, climatização e aparelhos elétricos) e o comportamento dissipativo do edifício (desprovidos de isolamento térmico ou com isolamento deficiente) (Pereira *et al.*, 2015)).

Atualmente existem normas que promovem a utilização de soluções passivas, regulam medidas de poupança e eficiência energética de forma a criar edifícios de consumo energético zero. Contudo existirá na mesma a necessidade de soluções aquecimentos e arrefecimento ativo em grande parte dos edifícios e em grande parte das condições climatéricas (Henning & Döll, 2012).

4.3. Necessidade de climatização

Em média a população urbana passa entre 80 a 90% do seu tempo no interior de espaços edificados (Klepeis *et al.*, 2001). Autores como Blondeau *et al.* (2005) referem que frequentemente em ambiente urbano a qualidade do ar interior apresenta pior qualidade que o ar exterior. A qualidade do ar interior afeta tanto a saúde e o conforto dos seus ocupantes tendo também reflexo nos seus níveis de produtividade (Wargocki *et al.*, 2001). Os principais fatores que afetam a qualidade do ar interior são a temperatura, a humidade, a taxa de renovação do ar, o movimento do ar, a ventilação, partículas e gases poluentes (Graudenz *et al.*, 2005).

No interior de um compartimento fechado existem inúmeros fatores que deterioram a qualidade do ar do espaço. Existem fontes de calor internas (ocupantes, iluminação, equipamentos) e externas resultantes da interação entre a envolvente do espaço com o interior (figura 4.9). Devido à ocupação, existe também a produção de CO₂ (Dióxido de Carbono), a libertação de vapor de água e a possibilidade de formação de odores. Pode haver também excesso ou um défice de humidade no ar. Caso não houvesse renovação do ar interior, de forma passiva ou ativa, a permanência prolongada dos ocupantes no espaço tornar-se-ia intolerável.

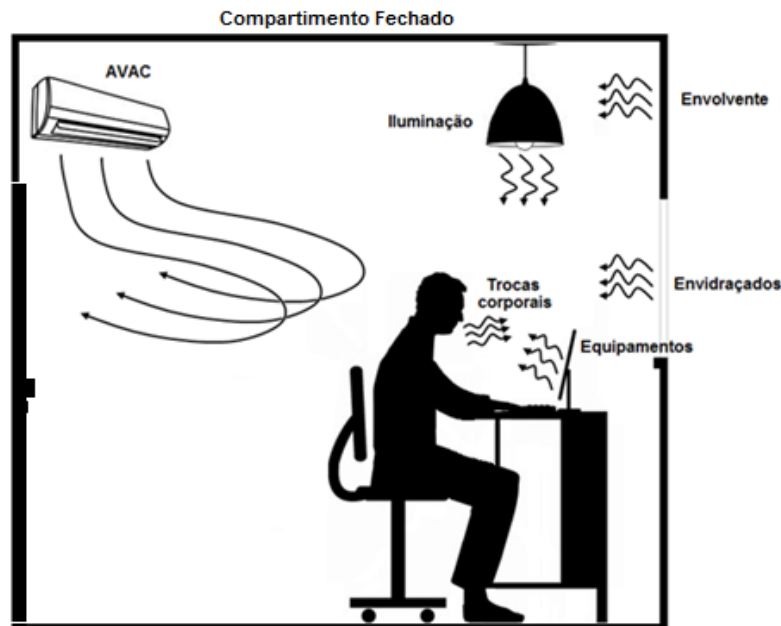


Figura 4.9: Fatores que alteram a qualidade do ar num espaço.

Em termos de transferência de calor, as variáveis climáticas que têm maior influência sobre a envoltente dos edifícios são a temperatura do ar exterior e a radiação solar.

Os fluxos energéticos consistem em ganhos ou perdas de calor que ocorrem no interior de um compartimento podendo também ser designados de cargas térmicas. Em situações de verão os as cargas térmicas são positivas, sendo que a deslocação do fluxo dá-se no sentido do exterior para o interior consistindo em ganhos térmicos uma vez que estas trocas se refletem num aumento da carga térmica do edifício e conseqüentemente a sua temperatura interna. No inverno as trocas de calor através da envoltente são feitas no sentido inverso, denominando-se de perdas térmicas, estas perdas estão entre os motivos principais para a diminuição da temperatura interior do edifício (Gonçalves & Graça, 2004).

Para manter a temperatura interior constante é necessário remover as cargas térmicas (positivas ou negativas) do espaço, caso contrário, a temperatura do ar interior tenderá a aumentar ou a diminuir. A remoção das cargas térmicas de um local é, normalmente, feita com recurso a um fluido que ao atravessar o espaço dissipa as cargas. O fluido remove ou cede calor, consoante as cargas térmicas existentes sejam positivas ou negativas, repondo as condições interiores pretendidas.

A renovação do ar do compartimento efetuará a dissipação de odores, uma diluição da concentração de gases poluentes e vapores libertados na sala e diminuirá o número de partículas suspensas no ar. A entrada de ar novo permitirá ainda controlar a temperatura do espaço em função do diferencial de temperaturas entre o interior e o exterior. O sistema

de climatização também é responsável pelo controlo da humidade do espaço bem como pela circulação de ar no compartimento. A velocidade do ar no compartimento é controlada através da introdução ou extração do caudal de ar insuflado. Em ambientes interiores a velocidade do ar é por norma inferior a 1m/s. A deslocação do ar, por convecção natural, ocorre em consequência da diferença de temperaturas, o ar quente tem tendência ascendente e o ar frio tem tendência descendente. Imprimir um movimento forçado por meios mecânicos ao deslocamento do ar causa um aumento do coeficiente de convecção e consequentemente aumenta a sensação de perda de calor. O efeito da deslocação de ar causa também um aumento da evaporação corporal, diminuindo assim a sensação de calor.

Numa sala fechada a energia libertada por pessoas e equipamentos eleva a temperatura do ar interior. Devido à ocupação, existe a produção de CO₂, a libertação de vapor de água e a possibilidade de formação de odores. Caso não houvesse renovação deste ar ao fim de algum tempo tornar-se-ia impossível para os ocupantes desenvolver as suas atividades. No verão, a temperatura do ar interior seria excessiva, a qualidade do ar interior seria inexistente, apresentando uma elevada concentração de gases poluentes e partículas. Quando as perdas de calor através da envolvente da sala caso são elevadas podem provocar um arrefecimento significativo no interior, ficando o ambiente demasiado frio e caso estas sejam reduzidas não conseguem compensar o calor gerado no compartimento, ficando o ambiente demasiado quente. Também neste caso a qualidade do ar interior seria inexistente, apresentando uma elevada concentração de gases poluentes e de partículas inaceitável. A sensação de desconforto tornaria impossível a manutenção de uma atividade nessa sala. A entrada de ar novo na sala permitirá reduzir fortemente a concentração de gases e vapores libertados na sala e o nível de partículas suspensas no ar. A entrada de ar permitirá ainda reduzir a temperatura interior se esta for superior à temperatura do ar exterior. No entanto, se a temperatura exterior for baixa e o caudal de ar novo for elevado, a sala pode ficar a temperatura próxima da exterior e por isso desconfortável. Se a temperatura do ar exterior for muito elevada, a simples introdução de ar exterior não conseguirá criar uma temperatura confortável no interior da sala.

Os ganhos ou perdas de calor na sala designam-se por cargas térmicas. A forma mais comum de remover as cargas térmicas de um local é fazer com que estas sejam dissipadas num líquido ou num gás que atravessem esse local. O fluido remove ou cede calor, repondo as condições interiores pretendidas. Este fluido é aquecido ou arrefecido

consoante as cargas térmicas existentes sejam positivas ou negativas. Caso se pretenda a reutilização do fluido este deve retomar ao seu estado original. Este princípio é utilizado pela maioria dos sistemas de climatização.

Mas não basta apenas garantir a temperatura de um local. A climatização tem ainda que garantir a humidade e a qualidade do ar. As concentrações dos poluentes terão que ser nulas ou muito reduzidas. O nível de partículas terá também que ser reduzido. A diminuição da concentração de gases e odores é efetuada através de sistemas climatização recorrendo à ventilação. O controlo da humidade no interior da sala também é controlada pelo sistema de climatização.

4.3.1. Refrigerantes

Um refrigerante é um fluido utilizado para absorver e transmitir calor da fonte quente para e ser arrefecido na fonte fria, o evaporador. Os refrigerantes absorvem calor a baixa temperatura e pressão e libertam calor em condições temperatura e pressão elevadas (Stoecker, 1958).

A escolha de um refrigerante deve ter em conta as suas características em termos de pressão de saturação e temperatura. Em relação à pressão de saturação este aspeto é importante uma vez que está relacionado com a pressão máxima de operação, que no caso de ser elevada exige que o sistema de tubagem e os reservatórios tenham espessuras superiores ao normal. A temperatura relaciona-se com a operação a temperaturas inferiores à atmosférica, o que deve ser evitado para impedir que o ar exterior penetre o sistema por eventuais aberturas.

Refrigerantes com baixo ponto de ebulição terão pressões superiores à atmosférica, mesmo operando a baixas temperaturas de evaporação.

Um ciclo que rejeite calor a temperaturas superiores à crítica, não apresentará a condensação de refrigerante, não tirando portanto vantagem da mudança de fase.

A norma ASHRAE 34a-1993 utiliza uma numeração alfanumérica para caracterizar os fluidos em termos de toxicidade e inflamabilidade. A letra “A” significa não tóxico e a letra “B” significa tóxico, enquanto que a numeração de 1 a 3 indica o nível de inflamabilidade sendo: 1 não inflamável, 2 inflamabilidade moderada e 3 inflamabilidade elevada (Roriz, 2007).

A nomenclatura definida pela ANSI/ASHRAE Standard 34-1992 para distinguir os refrigerantes consiste na atribuição de uma designação numérica precedida da letra “R”

para indicar que se trata de um refrigerante. Os fluídos frigoríficos constituídos por compostos inorgânicos são inseridos na série 700. O primeiro número indica tratar-se de uma substância inorgânica e os seguintes representam o valor aproximado do peso molecular da substância (Roriz, 2007).

Amoníaco

Com a progressiva eliminação de refrigerantes à base de clorofluorcarbonetos (CFC), hidroclorofluorcarbonetos (HCFC) e hidrofluorcarbonetos (HFC), surgiu a necessidade encontrar fluídos refrigerantes alternativos para aplicar em sistemas de refrigeração pré-existentes. Estes devem por um lado ter características termodinâmicas semelhantes aos hidrocarbonetos halogenados e mas serem seguros para os seres humanos e para o ambiente (ASHRAE, 2002).

O amoníaco é um fluído refrigerante alternativo adequado para utilização em sistemas de refrigeração e de ar-condicionado existentes e para novos sistemas que operem com amoníaco. O amoníaco tem um ponto de ebulição, um potencial de destruição do ozono (ODP) de 0,00 quando liberado para a atmosfera, e um elevado calor latente de vaporização (ver tabela 4.7 onde se apresentam as principais propriedades físicas e químicas do amoníaco). Estas características tornam-no num refrigerante de alta eficiência energética com problemas ambientais mínimos.

Tabela 4.7: Principais propriedades físicas e químicas do amoníaco.

Família	Compostos inorgânicos
Designação numérica	717
Classe	B2
Nome	Amoníaco
Fórmula	NH ₃
Massa molecular	17,03
Ponto de ebulição (°C)	-33,3
Ponto de solidificação (°C)	-77,7
Temperatura crítica (°C)	133
Pressão crítica (KPa)	11417
Calor latente de vaporização (KJ/kg)	1312,6

[Fonte: Dossat & Horan, (2002)]

O amoníaco tem propriedades químicas diferentes dos refrigerantes à base de fluorcarbonetos, nomeadamente é inflamável, tóxico e corrosivo. Portanto, a sua manipulação deve abranger medidas de segurança adequadas. No entanto, o seu odor forte

ajuda a alertar para uma potencial fuga e reduzir a exposição a concentrações potencialmente perigosas.

4.4. Sistemas de refrigeração

A refrigeração pode ser definida como o processo de alcançar e manter um temperatura abaixo daquela do ambiente, com o objetivo de arrefecer algum produto ou para o espaço a temperatura necessária. Uma das aplicações mais importantes de refrigeração tem sido a preservação de produtos alimentares perecíveis, armazenando-a a baixas temperaturas. Os sistemas de refrigeração são também amplamente utilizados para proporcionar condições de conforto térmico aos ocupantes de um espaço fechado, através de sistemas de ar-condicionado.

O processo de refrigeração consiste na remoção de calor de um fluido através da utilização de um fluido refrigerante (Wang, 2000). O fluido refrigerante atua de forma a que a temperatura do fluido se mantenha a uma temperatura mais baixa que a exterior ao compartimento de refrigeração. De um ponto de vista termodinâmico existem vários processos com capacidade de utilizar radiação solar para produzir frio. Embora a conversão de energia fotovoltaica em eletricidade e o seu subsequente uso para acionar o motor de um ar-condicionado ser conceito comprovadamente, não é aqui abordado.

A figura 4.10 apresenta um esquema básico do processo, onde:

- Q_{frio} representa o calor rejeitado no evaporador do refrigerador;
- Q_{quente} é a quantidade de calor fornecida ao gerador para iniciar o processo;
- $Q_{\text{rejeitado}}$ é o resultante da soma dos calores Q_{frio} e Q_{quente} .

O calor Q_{quente} é fornecido ao sistema através de eletricidade, gás ou com recurso a um sistema de solar.

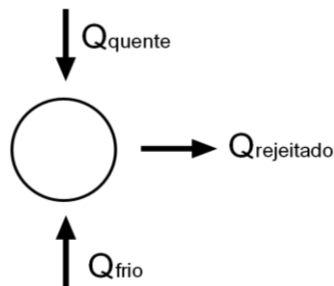


Figura 4.10: Esquema básico do processo de refrigeração.

A eficiência do processo de refrigeração por ciclo de absorção é dada pelo COP (*Coefficient of Performance*) que representa a fração entre o calor útil rejeitado no evaporador (Q_{frio}) e o calor produzido no gerador (Q_{quente}) através da equação 4.2

$$COP = \frac{Q_{frio}}{Q_{quente}} \quad 4.2$$

4.4.1. Refrigeração por ciclo de compressão de vapor

O ciclo de compressão é assim denominado porque é no compressor que ocorre a mudança de estado do refrigerante devido ao aumento de pressão. A bomba faz a transferência do calor do compartimento para o exterior (Althouse *et al.*, 2004).

No processo de refrigeração por ciclo de compressão de vapor, o refrigerante entra em ebulição ao passar pelo evaporador onde absorve o calor existente no interior do compartimento a ser arrefecido. Posteriormente o vapor sofre um processo de compressão onde vê a sua temperatura e pressão aumentar, no compressor. O vapor comprimido é encaminhado para o condensador onde o refrigerante liberta o calor. O fluido refrigerante passa através de uma válvula de expansão onde lhe é retirada pressão e retorna ao evaporador completando o ciclo (Wang, 2000).

4.4.2. Refrigeração por ciclo de absorção

A primeira máquina de refrigeração por absorção foi patenteada por Ferdinand Carré em 1859, esta originou dois tipos distintos de máquinas: uma de grande capacidade e ciclo contínuo, outra de pequena capacidade de ciclo intermitente, ambas utilizando amoníaco como fluido frigorigéneo. A máquina de pequena capacidade e ciclo intermitente era bastante simples, formada apenas por dois componentes principais que operavam de forma alternada, um como gerador/absorvedor outro como condensador/evaporador. Esta máquina tinha a capacidade de formar cerca de quilo de gelo com três quilos de carvão. Por sua vez a máquina de ciclo contínuo, mais complexa já tinha na sua constituição muitos elementos que ainda hoje incorporam as máquinas atuais, nomeadamente o gerador, retificador, condensador, válvula de expansão, evaporador e bomba de solução. Desde 1860 que era utilizada para fabricar gelo em grande escala. Durante os 20 anos que se seguiram a tecnologia de absorção dominou todos os outros tipos de máquinas de refrigeração, até que os sistemas de compressão começaram a ser produzidos em larga escala. No período que e seguiu à primeira guerra mundial os sistemas compressão para

fins de climatização em edifícios públicos. Após a segunda guerra mundial ocorreu uma disseminação da utilização destes aparelhos para climatização das habitações. Atualmente os sistemas de compressão dominam o mercado.

O processo de refrigeração por absorção dá-se quando uma substância em determinado estado físico penetra e incorpora outra de um estado físico diferente. Ambas as fases possuem uma forte afinidade para formar uma solução ou uma mistura. O processo pode ser invertido quando, por ação de calor aplicado à mistura, a fase absorvida é libertada pelo absorvente.

A primeira máquina de refrigeração de absorção foi patenteada pelo cientista francês Ferdinand Carré em 1859. No sistema desenvolvido por Carré a água atuava como fluido absorvente e o amoníaco como fluido refrigerante.

Em 1920 Munters e von Platen desenvolveram o primeiro sistema por ciclo de absorção sem bomba para que, na ausência de partes móveis, tenha uma operação silenciosa (Rathore, 2010). Este sistema viria a ser comercializado em 1931 pela empresa Electrolux.

Atualmente a refrigeração por ciclo de absorção é a tecnologia de arrefecimento preferencial a nível mundial sendo uma das suas aplicações mais comum frigoríficos doméstico de pequeno porte. Este sistema tem mecanismos mais simples, é de fácil implementação, alta rentabilidade, grande longevidade e baixa manutenção (Bvumbe & Inambao, 2011).

Existem quatro processos que caracterizam o ciclo de absorção, onde ocorrem trocas de calor e massa, nomeadamente:

- separação (dessorção) do refrigerante no gerador;
- condensação do refrigerante no condensador;
- vaporização do refrigerante no evaporador;
- absorção do refrigerante pela solução no absorvedor.

4.4.2.1. Descrição do processo de refrigeração por ciclo de absorção – com bomba

O processo tem início com a condensação do fluido frigorigéneo proveniente do gerador sob a forma de vapor saturado que ascende até ao condensador, onde condensa devido ao arrefecimento provocado pela água que circula no permutador de calor, libertando o calor de vaporização. Ao passar pela válvula de expansão o fluido condensado sofre uma

mudança de pressão, transitando da zona de pressão alta para a zona de baixa pressão. No evaporador ocorre a evaporação do fluido frigorigéneo que arrefece a água que circula no permutador de calor e assim produz de frio passível de ser utilizado pelo sistema de climatização. O vapor produzido é então encaminhado para o absorvedor, onde será absorvido pela solução fraca em amoníaco proveniente da válvula expansão do circuito da solução. No final deste processo forma-se uma solução rica em amoníaco que é bombeada pela bomba de circulação para a zona de pressão alta do sistema. O ciclo termina com a entrada da solução rica no gerador onde é aquecida pela água que circula no permutador de calor (que pode provir de fontes renováveis, coletores solares, por exemplo) (Althouse *et al.*, 2004).

4.4.2.2. Descrição do processo de refrigeração por ciclo de absorção – sem bomba

A refrigeração solar com ciclo de absorção é o sistema mais extensivamente investigado e com maior volume de artigos publicados comparativamente com outros sistemas. O alto coeficiente de transferência de calor do absorvente permite que o sistema de refrigeração seja de pequenas dimensões.

O processo de refrigeração tem início no gerador com o fornecimento de calor à solução diluída de amoníaco. A solução concentrada de amoníaco proveniente do tanque de absorção, ao entrar no tubo de percolação é aquecida até entrar em ebulição (a uma temperatura mais baixa que a água) (Althouse *et al.*, 2004). Ao separar-se da solução diluída de amoníaco, o vapor de amoníaco (e algum vapor de água) é conduzido até ao retificador. O retificador consiste apenas uma secção do tubo ligeiramente mais fria que faz com que alguma água que possa ter evaporado condense e volte para trás. A partir deste ponto, apenas vapor puro de amoníaco alimenta o condensador (Althouse *et al.*, 2004; Kharagpur, 2008).

No tubo percolador, a solução diluída de amoníaco expelida do tubo de percolação pelo vapor de amoníaco mistura-se com a solução diluída de amoníaco que lá se encontra. A solução fraca de amoníaco segue então para o permutador, onde o calor é transferido para a solução rica de amoníaco à medida que é encaminhada para o tubo de percolação (Farhan, *et al.*, 2012). Aí a solução fraca de amoníaco flui até ao topo da serpentina de absorção que se encontra a uma temperatura inferior (Althouse *et al.*, 2004).

Ao entrar no condensador o vapor de amoníaco é arrefecido pela passagem de ar através das alhetas de metal. O efeito de refrigeração é obtido quando o vapor de amoníaco é forçado a mudar de fase, para o estado líquido, ao entrar na secção do evaporador, libertando o seu calor (Farhan, *et al.*, 2012).

O amoníaco, em estado líquido, entra no evaporador a baixa temperatura e escoia sob forma de gotas ao longo do tubo, humedecendo as suas paredes. O hidrogénio, fornecido pelo tubo interno do evaporador, passa através das paredes húmidas causando a evaporação do amoníaco líquido (Farhan, *et al.*, 2012). A evaporação do amoníaco absorve o calor latente, através das alhetas incorporadas no evaporador do frigorífico, criando assim o efeito de arrefecimento (Wang, 2000). O vapor de amoníaco gerado mistura-se então com o vapor de hidrogénio. Uma vez que a mistura de vapor de hidrogénio e amoníaco é mais pesada do que o hidrogénio puro, este escoia através do evaporador, através do tubo de retorno para o tanque de absorção (Farhan, *et al.*, 2012).

Uma vez mais leve, a mistura de amoníaco e hidrogénio (agora com uma concentração menor de amoníaco) inicia a subida até às alhetas do absorvedor (Althouse *et al.*, 2004).

Quando a mistura de vapor de amoníaco e de hidrogénio entra no tanque de absorção através do tubo de retorno, grande parte do vapor de amoníaco é absorvida pela solução concentrada de amoníaco, localizada na parte inferior do tanque (Farhan, *et al.*, 2012).

A solução fraca de amoníaco ao escoar pelas alhetas do absorvedor torna-se mais concentrada ao envolver-se com a mistura de vapor de amoníaco e hidrogénio e desloca-se no sentido ascendente (Farhan, *et al.*, 2012). À medida que sobe a solução fraca de amoníaco, absorve toda a amoníaco da mistura de amoníaco e de hidrogénio, permitindo ao hidrogénio puro a elevar-se retornando à secção do evaporador (Rathore, 2010).

A representação esquemática dos componentes do sistema de absorção por ciclo de amoníaco utilizando o amoníaco-água ilustrado pela figura 4.11.

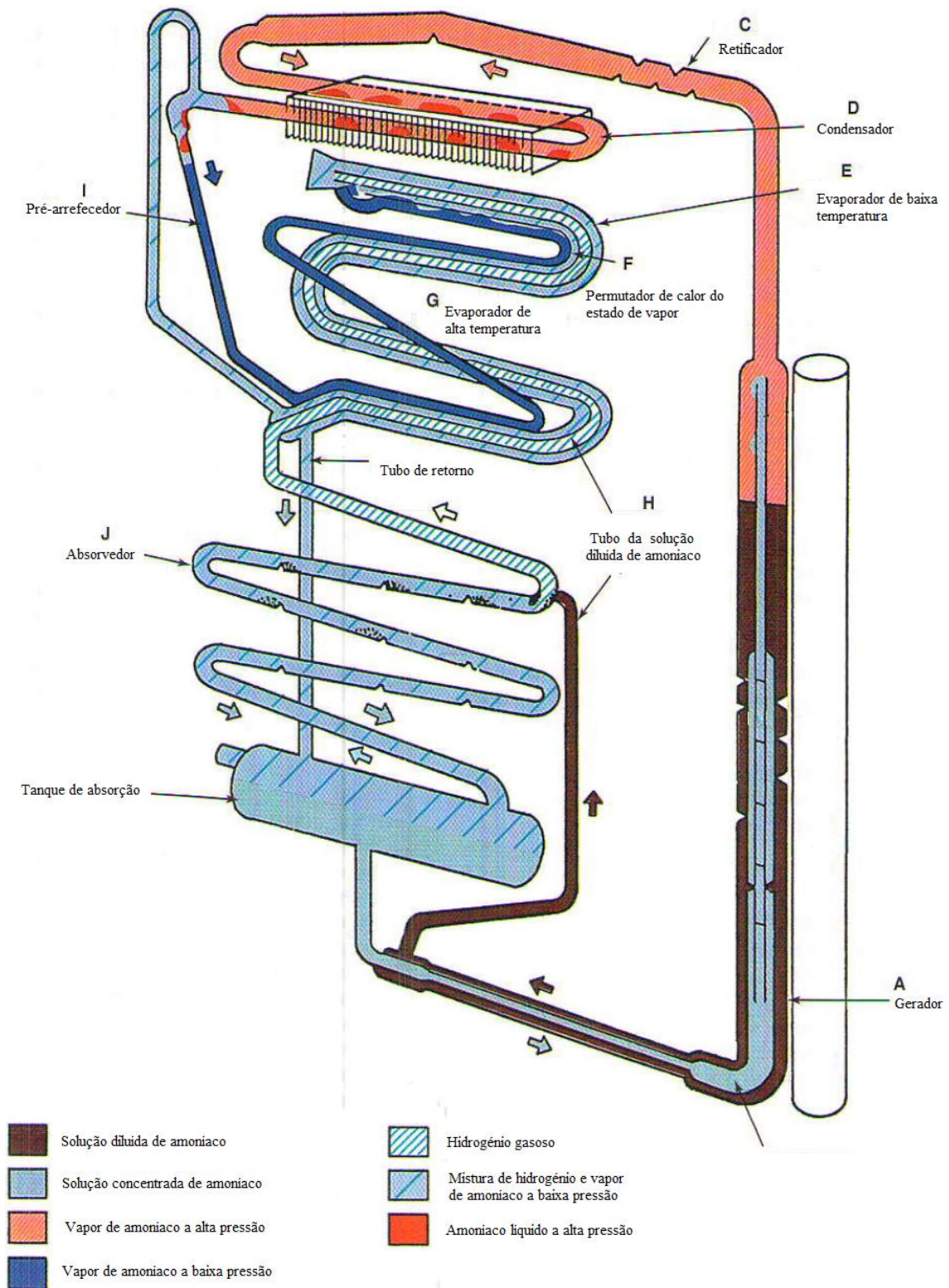


Figura 4.11: Esquema de uma máquina frigorífica de absorção.

[Fonte: Adaptado de (Althouse *et al.*, 2004)]

4.5. Sistemas AVAC

As siglas AVAC são uma abreviatura do termo Aquecimento, Ventilação e Ar-Condicionado. Os sistemas AVAC condicionam os parâmetros do ar num espaço, mantendo-os entre limites requeridos, de forma a que não seja causado desconforto nem que a saúde dos ocupantes seja afetada (Wang, 2000). Os sistemas de ar-condicionado, regra geral, desempenham as seguintes funções num espaço interior (Wang, 2000):

- Manter a qualidade do ar interior:
 - Renovação do ar;
 - Circulação do ar;
 - Filtração;
- Regulação da temperatura interior:
 - Aquecimento;
 - Arrefecimento;
- Regulação da humidade interior:
 - Humidificação;
 - Desumidificação;
- Controlo de pressão:
 - Pressão negativa;
 - Pressão positiva;
- Controlo do ruído.

O setor dos edifícios é um dos maiores consumidores finais de energia comparado com outros setores económicos. Estima-se que a nível europeu o setor dos edifícios seja responsável por cerca de 40% do consumo final de energia, ultrapassando o consumo dos setores dos transportes (32%) e da indústria (25%) (European Commission, 2014). A nível mundial, embora haja variações de percentagem de país para país, os edifícios são responsáveis por entre 30-45% dos consumos energéticos (Gul *et al.*, 2015). Em consequência do crescimento populacional e económico surge a necessidade de expansão dos edifícios dedicados aos serviços, este fator em conjunto com o aumento do tempo que os ocupantes passam no interior dos edifícios levou a um aumento do seu consumo energético (Pérez-Lombarda *et al.*, 2008). Nas últimas décadas tem-se verificado uma melhoria das condições de conforto térmico nos edifícios conseguida a através do investimento na envolvente térmica, bem como pela aquisição de sistemas ativos de

climatização. Entre as várias tipologias de edifícios de serviços destaca-se o crescimento significativo de sistemas de aquecimento, ventilação e ar-condicionado responsáveis pelos maiores consumos energéticos nos edifícios (figura 4.12).

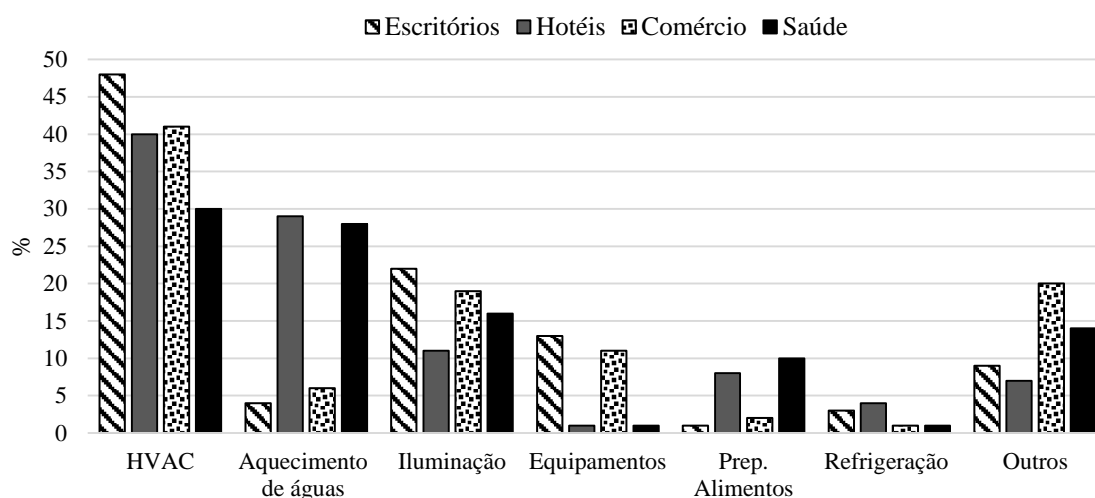


Figura 4.12: Distribuição dos consumos energéticos em diferentes tipologias de edifícios de serviços em 2001 nos USA.

[Fonte: EIA,(2001)]

4.6. Ar-condicionado solar

Durante os períodos de verão verifica-se um aumento substancial do recurso a aparelhos de ar-condicionado para fins de arrefecimento, uma vez que quando a radiação solar é mais intensa regra geral a carga térmica é mais elevada. Assim a utilização de sistemas que utilizem energia solar para fins de arrefecimento torna-se num conceito atrativo, pois as necessidades de arrefecimento coincidem, na maior parte do tempo, com o período de maior disponibilidade de radiação solar. Em países, como Portugal, onde há uma grande disponibilidade de radiação ao longo de todo o ano, é também interessante investigar a utilização de radiação para fins de aquecimento. A radiação solar pode ser convertida tanto em calor como em eletricidade. Ambas as formas de energia podem ser utilizadas para acionar sistemas de climatização.

Nas últimas décadas vários investigadores dedicaram-se ao desenvolvimento de tecnologias de produção de frio usando como fonte de alimentação a energia solar. Concretamente após a década de 70, face à crise petrolífera, despertou-se o interesse sobre esta tecnologia que tem como particularidade a climatização sem recurso a energia elétrica.

A primeira máquina capaz de converter energia solar em frio surgiu em 1872 por Albel Pifre que patenteou o primeiro frigorífico solar. Para tal recorreu a uma caldeira solar para fornecer calor a uma máquina de absorção a petróleo, produzindo uma pequena quantidade de gelo (Thévenot, 1979). A partir daí muitos sistemas e tecnologias foram desenvolvidas e introduzidas na literatura e outros encontram-se atualmente em progresso. Estas tecnologias variam conforme: a temperatura requerida, a tecnologia de refrigeração selecionada ou dependendo da tecnologia solar. A maioria dos sistemas atuais são de absorção acionados termicamente, concebidos para sistemas de ar-condicionado. No entanto a técnica de refrigeração solar tem sido explorada não só em sistemas de ar-condicionado mas também para produção de gelo em zonas remotas, com abundância de radiação solar, mas sem acesso a eletricidade, com o intuito de preservar alimentos ou medicamentos.

Como foi referido anteriormente a radiação solar pode ser convertida tanto em calor como em eletricidade. Um sistema de climatização solar que converte radiação em energia elétrica, utiliza células ou painéis fotovoltaicos que alimentam um sistema de ar-condicionado elétrico. As células solares são basicamente semicondutores cuja eficiência e custo variam amplamente dependendo do material de que são compostas. A maior vantagem associada a estes sistemas é a fácil construção e alta eficiência geral quando combinado com sistemas convencionais de compressão de vapor (Kim & Ferreira, 2008).

Ao contrário dos sistemas de climatização solar elétricos os sistemas solares térmicos convertem radiação em calor. O fluido térmico quente pode ser utilizado como fonte de calor para um sistema de climatização por absorção, pelo que a radiação solar servirá neste caso como fonte de calor para a produção de frio.

Atualmente as máquinas climatização por ciclo de absorção conseguem atingir COPs compreendidos entre 0,3 e 1,2. A seleção de uma máquinas climatização por ciclo de absorção dependente essencialmente do desempenho do coletor solar a usado. Para coletores solares com eficiência capazes operar eficientemente a temperaturas que rondam os 150° C, existem *chillers* de duplo efeito que utilizam o para brometo de lítio-água com COPs cerca de 1,2 para fins de ar-condicionado. Existem também *chillers* de absorção que utilizam o par amónia-água com COPs em torno de 0,8. O meio de transferência de calor pode ser um fluido com o ponto de ebulição elevado ou vapor.

Recentemente têm sido introduzidos no mercado *chillers* de LiBr-H₂O (Brometo de Lítio) de duplo efeito com COP entre 1,1 e 1,2 resultando de adaptações feitas a sistemas de absorção acionados por gás. Estes sistemas podem ser adaptados a sistemas solares associados a coletores solares de alta temperatura. Qu *et al.* (2010) estudaram o desempenho de um sistema de ar-condicionado solar por ciclo de absorção com duplo efeito, para fins de aquecimento e arrefecimento, na universidade de Carnegie Mellon, no estado da Pensilvânia nos Estados Unidos da América. O sistema desenvolvido é constituído por 52 m² de área de coletores solares parabólicos, um *chiller* (16 kW) de absorção com duplo efeito onde o fluido refrigerante é o par LiBr-H₂O, um permutador de calor, bomba de circulação e válvulas de expansão. O *chiller* de absorção estava adaptado a funcionar através de combustão de gás quando a energia solar não estava disponível. Segundo os autores, em condições típicas de verão a eficiência do sistema de coletores solares parabólicos foi de 33-40% para valores típicos de radiação solar direta entre 600 e 850 W/m² tendo sido possível elevar a temperatura do fluido entre 150 e 160°C. O COP do *chiller* de absorção encontrava-se na faixa de 1,0 a 1,1. O COP do sistema de refrigeração solar consistiu no produto da COP do *chiller* de absorção e a eficiência do coletor solar, apresentava valores de aproximadamente 0,33-0,44. A potência máxima do *chiller* de absorção foi de 12 kW.

Investigadores alemães estudaram a aplicação de coletores solares com capacidade de atingir temperaturas de 200°C, para fornecer calor a dois sistemas ar-condicionado solar térmico que utiliza a o par NH₃-H₂O (Weber *et al.*, 2014). Através da sua experiência conseguiram arrefecer água entre 12 e 0°C. O coletor atingiu a sua capacidade máxima para um pico de 70 kW e a capacidade máxima de ambos os sistemas mostrou valores de pico de até 25 kW (Weber *et al.*, 2014).

Said *et al.* (2016), investigadores da universidade de King Fahd University of Petroleum & Minerals (KFUPM – Arábia Saudita), conduziram com sucesso um estudo que se focava no desenvolvimento dos componentes de um *chiller* de absorção com amoníaco-água. Dimensionaram e construíram os componentes do *chiller* de absorção, do congelador onde é armazenado o gelo e dos coletores solares. Os resultados da experiência indicaram um coeficiente de desempenho (COP) do *chiller* de 0,69 e uma capacidade de arrefecimento de 10,1 kW quando o gerador atingiu 114°C, o condensador 23°C e o evaporador -2° C. Mesmo a quando foram atingidas temperaturas de 140° C no

gerador, 45° C no condensador e -4° C no evaporador a capacidade de arrefecimento do *chiller* era de 4,5 kW e o COP de 0,42.

Apesar de as tecnologias de climatização solar terem sido amplamente exploradas e já atingido um estado de maturação, a nível europeu no ano de 2005 a capacidade total instalada de sistemas de ar-condicionado solar era de apenas 6 MW (Nick-Leptin, 2005). Estima-se que até ao final do ano de 2011 devessem existir cerca de 1000 unidades de climatização solar, a nível mundial (Henning, 2011).

Cada tecnologia de climatização solar tem as suas vantagens e desvantagens, no entanto existem desvantagens comuns a todas elas, nomeadamente o elevado custo inicial Otanicar, *et al* (2012), a operação do sistema estar dependente da existência de radiação solar e quando ela está presente a eficiência máxima é limitada em torno das horas centrais do dia sendo estes os principais fatores apontados para a ainda baixa capacidade instalada. Chemisana *et al.* (2013) apontam ainda a baixa eficiência dos sistemas de absorção por efeito simples comumente utilizados nas unidades de ar-condicionado solar e a elevada área de coletores necessária para produzir energia térmica.

5. Modelos numéricos e Metodologia

Os modelos numéricos surgem devido à necessidade de simular diferentes condições num projetos sem a sua construção física, que apesar de produzir resultados realísticos está associada a custos materiais e dependente do tempo de construção. Assim os modelos numéricos tornaram-se uma ferramenta essencial na avaliação da viabilidade da construção de um projeto.

5.1. Eólica

Segundo Patterson & Apelt (1989) e Mertens (2006) existem três formas de estudar o fluxo de vento nomeadamente: medições *in situ*, testes em túnel de vento e simulação numérica baseada em cálculos computacional de dinâmica de fluídos.

O estudo aerodinâmico da turbina e do sistema de direcionamento do escoamento foi feito com recurso ao modelo *Computational Fluid Dynamics* (CFD). Segundo Conceição *et al.* (2014) o modelo CFD é baseado na resolução de equações diferenciais de dinâmica de fluidos simulando tridimensionalmente escoamentos turbulentos com transmissão de calor e massa, em regime turbulento. Blocken & Carmeliet (2004) e Chen (2004) argumentam que as simulações com o modelo CFD fornecem uma alternativa viável aos ensaios em túnel de vento, uma vez que as simulações numéricas são menos consumidoras de tempo, menos dispendiosas comparativamente aos testes em túnel de vento e permitem visualizar fácil e detalhadamente o fluxo de vento dentro do domínio em análise. Reiter (2010) considera o modelo CFD um bom *software* de simulação do fluxo de vento em torno dos edifícios uma vez que fornece dados detalhados das características do fluido em cada coordenada do edifício. De acordo com Jones *et al.* (2004) o modelo CFD era predominantemente usado para ensaios em espaços interiores e cálculos relativos a escoamento e ventilação, mas recentemente tem sido aplicado para simular fluxos de vento tridimensionalmente em espaços exteriores. Asfour and Gadi (2007) defende que o modelo CFD pode ser também aplicado para prever a taxa de escoamento, velocidade do ar, temperatura do ar, padrões de fluxo de ar dentro e em torno dos edifícios (figura 5.1a) e avaliar o escoamento gerado em torno de pedestres e o micro-ambiente criado em redor do corpo humano (figura 5.1b).

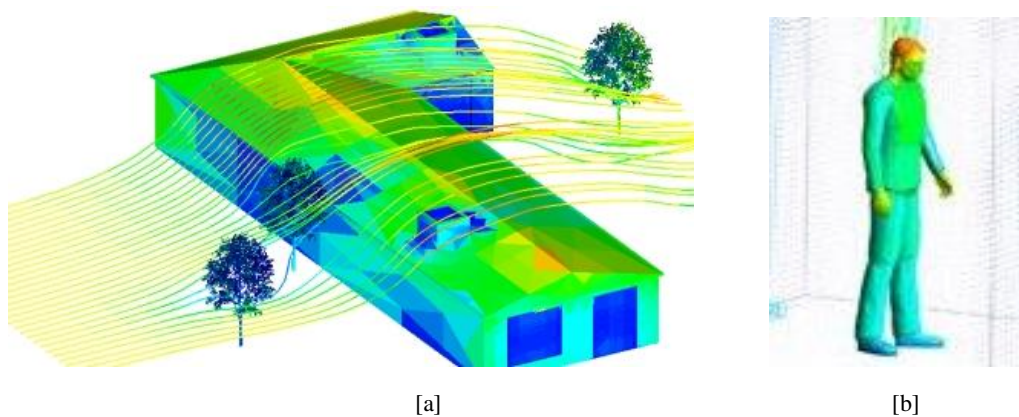


Figura 5.1: [a] Simulação CFD demonstrando o fluxo de ar em torno de um edifício e obstáculos.
[b] Simulação CFD demonstrando o fluxo de ar em torno de um corpo humano.

[Fontes:

[a] http://hanleyinnovations.blogspot.pt/2012_04_01_archive.html

[b] http://www.iesd.dmu.ac.uk/research/project/cfd_fiala.html]

Este programa permite também simular a interação da massa de ar com as lâminas da turbina. Na figura 5.2 está representado o movimento transitório de mecha numa simulação CFD, onde é possível verificar a pressão e forças de impulsão exercidas na turbina, bem como rasto associado à passagem da massa de ar.



Figura 5.2: Simulação CFD do movimento transitório de mecha incidente nas lâminas de uma turbina.

[Fonte: Stankovic, *et al.*, (2009)]

5.2. Solar

A modelação numérica do desempenho dos sistemas AVAC em estudo foi feita com recurso ao *software* “*Efficient Buildings*”. Este *software* tem vindo a ser desenvolvido nos últimos anos pelo Professor Doutor Eusébio Conceição. O modelo numérico simula o comportamento térmico de edifícios de topologia complexa e determina, quer a qualidade do ar interior, quer o conforto térmico dos ocupantes. A aplicação do modelo em edifícios permite avaliar a evolução ao longo do tempo de parâmetros como a temperatura do ar no interior dos diversos compartimento que constituem o edifício, das superfícies opacas e transparentes, da temperatura média do ar interior, da temperatura dos coletores solares e da temperatura do fluído no interior de condutas (Conceição *et al.*, 2014). A manutenção

destes parâmetros tem como objetivo manter o conforto térmico dos ocupantes e simultaneamente reduzir o consumo energético do edifício (Ruano *et al.*, 2006). O modelo baseia-se em equações integrais de balanço de energia e mássico, em regime uniforme ou transitório (Conceição, 2003; Conceição & Lúcio, 2008 e Conceição & Lúcio, 2006). Para controlo do erro associado à resolução do sistema de equações é utilizado o método de Runge-Kutta-Fehlberg.

5.2.1. Equações

Para a modelação numérica foi necessário desenvolver equações de balanço de massa e energia para cada componente do sistema AVAC. Foram portanto aplicadas equações aos seguintes componentes: absorvedor, bomba de solução, dispositivo de expansão, permutador de calor de solução, gerador, retificador, condensador, permutador de calor de pré-arrefecimento e evaporador.

Os balanços de massa podem ser desenvolvidos a partir da equação geral 5.1:

$$\sum \dot{m}_e = \sum \dot{m}_s \quad (5.1)$$

Onde: \dot{m}_e = Caudal mássico de entrada [kg/s]

\dot{m}_s = Caudal mássico de saída [kg/s]

Os balanços da fração mássica de amoníaco podem ser desenvolvidos a partir da equação geral 5.2:

$$\sum \dot{m}_e x_e = \sum \dot{m}_s x_s \quad (5.2)$$

nde:

x_e = Fração mássica de amoníaco à entrada [kgNH₃/kg mistura]

x_s = Fração mássica de amoníaco à saída [kgNH₃/kg mistura]

Os balanços de energia podem ser desenvolvidos a partir da equação geral 5.3:

$$\sum \dot{m}_e h_e - \sum \dot{m}_s h_s + \dot{Q} - \dot{W} = 0 \quad (5.3)$$

Onde:

h_e = Entalpia à entrada [J/kg]

h_s = Entalpia à saída [J/kg]

Equações do sistema de ar-condicionado

A figura 5.3 ilustra o esquema dos componentes principais e sequência de funcionamento do sistema AVAC.

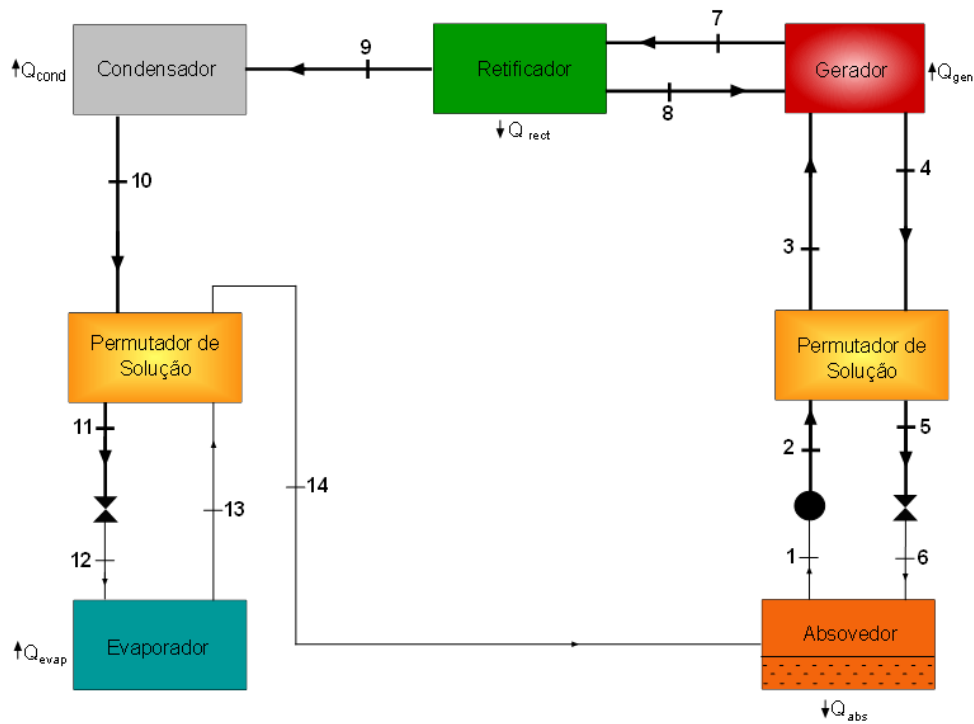


Figura 5.3: Esquema do ciclo de absorção a $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$ de um sistema AVAC.

Nesta secção são apresentadas as equações de balanço de massa, amoníaco e energia, desenvolvidas por componente do sistema de ar-condicionado:

Absorvedor

$$\dot{m}_{14} + \dot{m}_6 = \dot{m}_1 \quad (5.4)$$

$$\dot{m}_{14}x_{14} + \dot{m}_6x_6 = \dot{m}_1x_1 \quad (5.5)$$

$$\dot{m}_{14}h_{14} + \dot{m}_6h_6 = \dot{m}_1h_1 + Q_{abs} \quad (5.6)$$

Circuito 1:

$$x_1 = x_2 \quad (5.7)$$

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 \quad (5.8)$$

Bomba:

$$\dot{m}_1 h_1 + W_b = \dot{m}_2 h_2 \quad (5.9)$$

$$h_2 = h_1 + W_b \quad (5.10)$$

Circuito 2:

$$x_2 = x_3 \quad (5.11)$$

$$\dot{m}_2 = \dot{m}_3 \quad (5.12)$$

Permutador:

$$\dot{m}_2 + \dot{m}_4 = \dot{m}_3 + \dot{m}_5 \quad (5.13)$$

$$\dot{m}_2 x_2 + \dot{m}_4 x_4 = \dot{m}_3 x_3 + \dot{m}_5 x_5 \quad (5.14)$$

$$Q_{ps} = \dot{m}_2 h_2 + \dot{m}_4 h_4 = \dot{m}_3 h_3 + \dot{m}_5 h_5 \quad (5.15)$$

Circuito 4:

$$x_4 = x_5 \quad (5.16)$$

$$\dot{m}_4 = \dot{m}_5 \quad (5.17)$$

Circuito 5:

$$x_5 = x_6 \quad (5.18)$$

$$\dot{m}_5 = \dot{m}_6 \quad (5.19)$$

Gerador:

$$\dot{m}_3 + \dot{m}_8 = \dot{m}_4 + \dot{m}_7 \quad (5.20)$$

$$\dot{m}_3 x_3 + \dot{m}_8 x_8 = \dot{m}_4 x_4 + \dot{m}_7 x_7 \quad (5.21)$$

$$Q_{gen} + \dot{m}_3 h_3 + \dot{m}_8 h_8 = \dot{m}_4 h_4 + \dot{m}_7 h_7 \quad (5.22)$$

Retificador:

$$\dot{m}_7 = \dot{m}_8 + \dot{m}_9 \quad (5.23)$$

$$\dot{m}_7 x_7 = \dot{m}_8 x_8 + \dot{m}_9 x_9 \quad (5.24)$$

$$\dot{m}_7 h_7 = \dot{m}_8 h_8 + \dot{m}_9 h_9 + Q_{rect} \quad (5.25)$$

Condensador:

$$\dot{m}_9 = \dot{m}_{10} \quad (5.26)$$

$$\dot{m}_9 x_9 = \dot{m}_{10} x_{10} \quad (5.27)$$

$$\dot{m}_9 h_9 = \dot{m}_{10} h_{10} + Q_{cond} \quad (5.28)$$

Circuito 10:

$$\dot{m}_{10} = \dot{m}_{11} \quad (5.29)$$

$$\dot{m}_{10} x_{10} = \dot{m}_{11} x_{11} \quad (5.30)$$

Pré arrefecedor:

$$Q_{pre} = \dot{m}_{10} x_{10} + \dot{m}_{13} x_{13} = \dot{m}_{11} x_{11} + \dot{m}_{14} h_{14} \quad (5.31)$$

Circuito 11:

$$\dot{m}_{11}x_{11} = \dot{m}_{12}x_{12} \quad (5.32)$$

$$x_{11} = x_{12} \quad (5.33)$$

$$h_{11} = h_{12} \quad (5.34)$$

Evaporador:

$$\dot{m}_{12} = \dot{m}_{13} \quad (5.35)$$

$$x_{12} = x_{13} \quad (5.36)$$

$$\dot{m}_{12}h_{12} + Q_{evap} = \dot{m}_{13}h_{13} \quad (5.37)$$

Onde:

\dot{m} – Caudal Mássico [kg/s]

x – Fração Mássica de Amoníaco [kgNH₃/kg mistura]

h – Entalpia [kJ]

W_b – Potência da Bomba [kW]

Q_{abs} – Potência Calorífica do absorvedor [kW]

Q_{ps} – Potência Calorífica do permutador [kW]

Q_{gen} – Potência Calorífica do gerador [kW]

Q_{rect} – Potência Calorífica do retificador [kW]

Q_{cond} – Potência Calorífica do condensador [kW]

Q_{pre} – Potência Calorífica do pré-arrefecedor [kW]

Q_{evap} – Potência Calorífica do evaporador [kW]

Edifício

A geometria do edifício é utilizado no desenvolvimento de equações integrais de balanço de massa e energia para os corpos opacos, corpos transparentes, corpos interiores, sistema de condutas de ventilação, interior de espaços e condutas (equações 5.38 a 5.41).

A equação de balanço de energia do ar interior nos espaços é dado pela equação (5.38):

$$m_{ar}c_{par} \frac{dT_{ar}}{dt} = \sum_i \dot{Q}_{OB_{ar}} + \sum_j \dot{Q}_{TB_{ar}} + \sum_j \dot{Q}_{IB_{ar}} + \dot{Q}_G + \dot{Q}_O + \dot{Q}_V + \dot{Q}_L + \dot{Q}_D \quad (5.38)$$

Onde:

m_{ar} – massa do ar

c_{par} – Calor específico do ar

T_{ar} – temperatura do ar

t - tempo

$\dot{Q}_{OB_{ar}}$ – calor trocado entre o ar e os corpos opacos

$\dot{Q}_{TB_{ar}}$ – calor trocado entre o ar e os corpos transparentes

$\dot{Q}_{IB_{ar}}$ – calor trocado por convecção entre ar e os espaços interiores

\dot{Q}_G – calor gerado no espaço por sistemas AVAC, iluminação, equipamentos elétricos, etc

- \dot{Q}_O – calor gerado pelos ocupantes
- \dot{Q}_V – calor associado ao sistema de ventilação
- \dot{Q}_L – calor latente trocado entre o ar e as superfícies
- \dot{Q}_D – calor trocado por convecção entre o ar e o sistema de condutas

O balanço de energia nos corpos opacos é dado pela equação (5.39):

$$m_{OB}Cp_{OB} \frac{dT_{OB}}{dt} = \dot{Q}_{OB}^- + \dot{Q}_{OB}^+ + \dot{Q}_D + \dot{Q}_{RS} + \dot{Q}_{RC} + \dot{Q}_{Ri} + \dot{Q}_{OB_{ar}} + \dot{Q}_L \quad (5.39)$$

Onde:

- m_{OB} – massa dos corpos opacos
- Cp_{OB} – calor específico dos corpos opacos
- T_{OB} – Temperatura dos corpos opacos
- t – tempo
- \dot{Q}_{OB}^- – calor trocado entre a camada atual e a anterior
- \dot{Q}_{OB}^+ – calor trocado entre a camada atual e a seguinte
- \dot{Q}_D – calor trocado a camada e o sistema de condutas
- \dot{Q}_{RS} – calor gerado por radiação solar direta e difusa
- \dot{Q}_{RC} – calor gerado por radiação de outros corpos ou pelo céu
- \dot{Q}_{Ri} – calor trocado por radiação no interior de um espaço entre as superfícies dos corpos opacos e outros
- $\dot{Q}_{OB_{ar}}$ – calor trocado por convecção entre as camadas envolventes e o ar
- \dot{Q}_L – calor latente trocado entre os corpos opacos e o ar

O balanço de energia nos corpos interiores é dado pela equação (5.40):

$$m_{IB}Cp_{IB} \frac{dT_{IB}}{dt} = \dot{Q}_{IB_{ar}} + \dot{Q}_{RS} + \dot{Q}_{Ri} + \dot{Q}_L \quad (5.40)$$

Onde:

- m_{IB} – massa dos corpos interiores
- Cp_{IB} – calor específico dos corpos interiores
- T_{IB} – temperatura dos corpos interiores
- t – tempo
- $\dot{Q}_{IB_{ar}}$ – calor trocado por convecção entre os corpos interiores e ar ambiente
- \dot{Q}_{RS} - calor gerado por radiação solar direta e difusa

\dot{Q}_{Ri} – calor trocado por radiação no interior de um espaço entre as superfícies dos corpos interiores e outros

\dot{Q}_L - calor latente trocado entre os corpos interiores e o ar

O balanço de massa para o vapor de água no interior dos espaços é dado pela equação 5.41:

$$V \frac{dC}{dt} = \dot{m}_{oi} - \dot{m}_{io} + \dot{m}_{ji} - \dot{m}_{ij} + \dot{m}_g + \dot{m}_{OB} + \dot{m}_{TB} + \dot{m}_{IB} \quad (5.41)$$

Onde:

V – volume do espaço

C – concentração de vapor de água

t - tempo

\dot{m}_{oi} – fluxo de vapor de água no espaço interior, proveniente no exterior

\dot{m}_{io} – fluxo de vapor de água no exterior, proveniente do espaço interior

\dot{m}_{ji} – fluxo de vapor proveniente de outro compartimento para o espaço

\dot{m}_{ij} – fluxo de vapor proveniente do espaço para outro compartimento

\dot{m}_g – vapor de água gerado no interior do compartimento

\dot{m}_{OB} – vapor de água trocado entre o ar e os corpos opacos

\dot{m}_{TB} – vapor de água trocado entre o ar e os corpos transparentes

\dot{m}_{IB} – vapor de água trocado entre o ar e os corpos interiores

5.2.2. Sistema de controlo

Os sistemas de ar-condicionado tradicionais baseiam-se no controlo da temperatura do ar interior imposta pelos ocupantes. Neste trabalho para além das temperaturas estabelecidas, para condições de verão e inverno, na legislação portuguesa é também estudada a implementação do controlo do índice PMV e PPD ao sistema de ar-condicionado (ver figura 5.4). Este índice engloba outras variáveis para além da temperatura nomeadamente, temperatura média radiante, velocidade e humidade relativa do ar, camadas de vestuário e nível de atividade física dos ocupantes.

Em condições de Inverno o sistema de ar-condicionado é acionado quando os índices de PMV atingirem valores inferiores a -0,7. Em condições de Verão, quando o índice de PMV for superior a +0,7, o sistema de ar-condicionado é ligado. Estes valores definem o limite da categoria de C de conforto da norma ISO 7730 (2005) estando associados um máximo de 15% de pessoas termicamente insatisfeitas (PPD). Este índice pressupõe que

em condições de inverno o desconforto térmico sentido pelos ocupantes do espaço é por frio, e por calor em condições de verão, garantindo que pelo menos 85% dos ocupantes estão confortáveis.

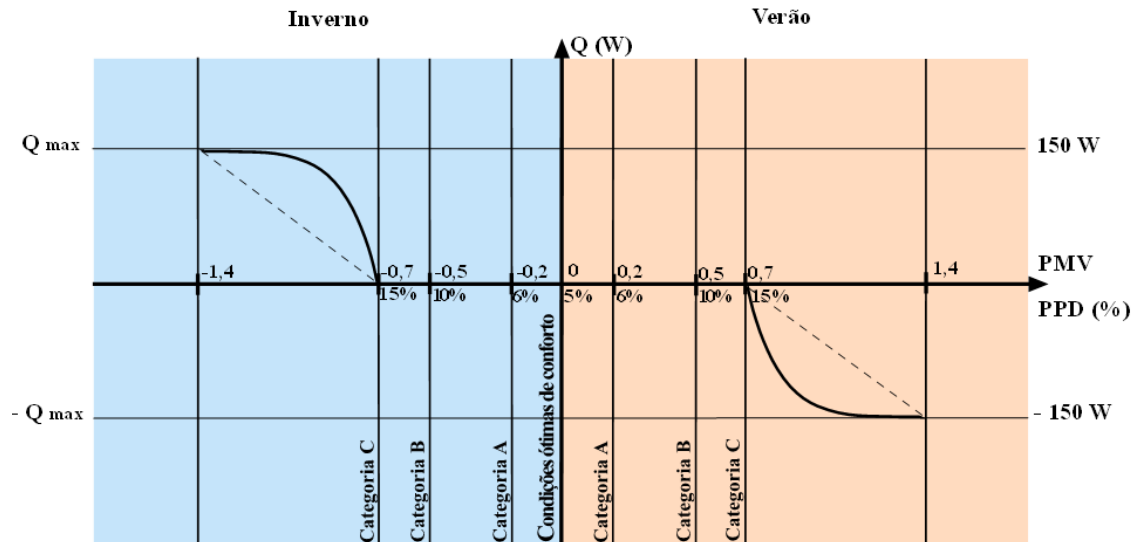


Figura 5.4: Sistema de controlo do PMV implementado ao sistema de ar-condicionado.

De inverno o controlo foi feito com base no seguinte conjunto de equações:

$$\begin{cases} Q_{ar}(i) = -1928,6 PMV(i) + 1350, & se PMV(i) < -0,73 \\ Q_{ar}(i) = -23,81 PMV(i) - 116,67, & se PMV(i) \geq -0,73 \end{cases} \quad (5.42)$$

O sistema de equações apresentado anteriormente representa retas com diferentes declives, sempre que as condições de conforto saem dos parâmetros da categoria C, ou seja, sempre que ocorrem valores de PMV inferiores a -0,7, o sistema de controlo atua e o ar-condicionado é ativado de forma a restabelecer as condições de conforto.

De verão o controlo foi feito com base no seguinte conjunto de equações:

$$\begin{cases} Q_{ar}(i) = -1928,6 PMV(i) + 1350, & se PMV(i) < 0,73 \\ Q_{ar}(i) = -23,81 PMV(i) - 116,67, & se PMV(i) \geq 0,73 \end{cases} \quad (5.43)$$

À semelhança do sistema de controlo de inverno, no verão sempre o PMV atinge valores superiores a 0,7, o sistema de controlo atua de forma a restabelecer as condições de conforto no compartimento.

6. Projeto ASHRAE

A associação Norte Americana ASHRAE – American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineering financiou o projeto “*Development of a Laboratory Solar Refrigerator*” que consistiu no desenvolvimento de um protótipo experimental de um frigorífico solar, baseado no ciclo de absorção com amoníaco-água.

Os ensaios experimentais foram realizados com recurso a um frigorífico de ciclo de absorção de amoníaco-água adaptado de forma a que a fonte de calor seja fornecida por um coletor solar CPC em vez do fornecimento original por gás propano ou eletricidade (figura 6.1).

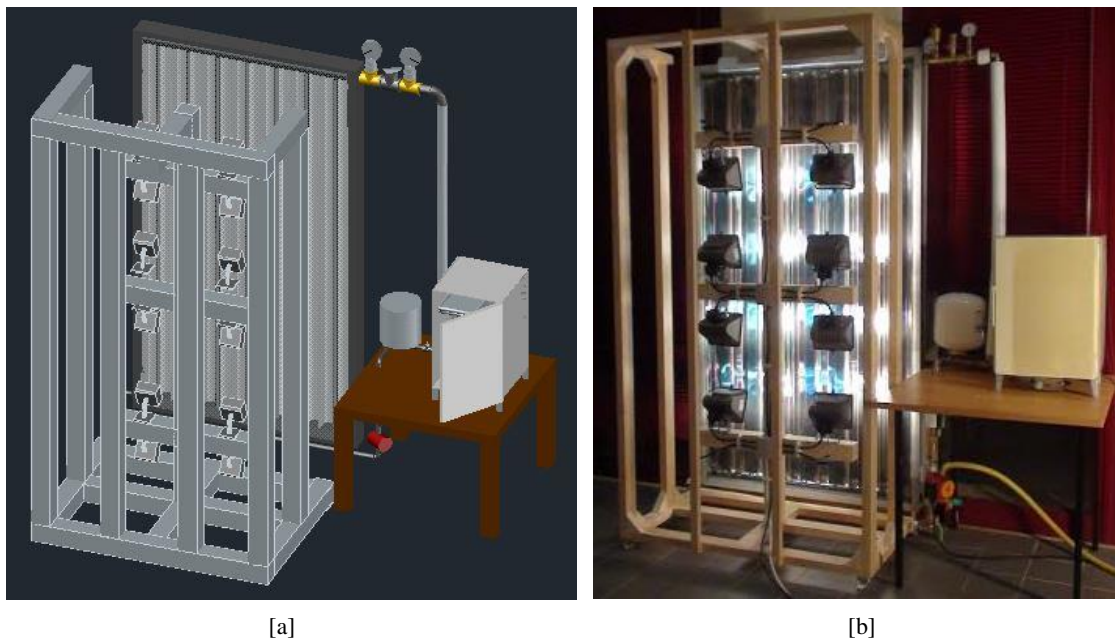


Figura 6.1. [a] Desenho assistido por computador da montagem experimental do sistema do frigorífico solar. [b] Montagem experimental do sistema frigorífico solar.

Foi desenvolvido um modelo numérico que simula os principais componentes do sistema experimental, nomeadamente o coletor solar e os seus circuitos de água quente, o sistema frigorífico e o sistema de iluminação artificial que simula a radiação solar. Os ensaios experimentais permitiram validar o modelo do *software* que simula, em condições de Verão e de Inverno, os parâmetros ambientais no interior de diferentes compartimentos do edifício do Complexo Pedagógico da Universidade do Algarve.

Para mais detalhes consultar o relatório “*Development of a Laboratory Solar Refrigerator*”.

7. Caso de estudo

O caso de estudo centra-se num edifício de estudos universitários. À semelhança de outros edifícios escolares, estes edifícios são caracterizados por elevadas taxas de ocupação por metro quadrado e pelo elevado tempo que os ocupantes despendem no seu interior. Elevadas taxas de ocupação traduzem-se em ganhos térmicos internos significativos o que implicam requisitos mais exigentes de ventilação e qualidade do ar interior. Outra característica comum entre edifícios escolares é a elevada área de envidraçados nas paredes com o intuito de fornecer iluminação natural aos compartimentos mas que simultaneamente implica adição de cargas térmicas internas.

Contrariamente aos restantes edifícios escolares, de utilização predominantemente diurna, os edifícios universitários, por norma funcionam simultaneamente em regime diurno e noturno. Necessitando por isso de bons sistemas de iluminação artificial dos compartimentos.

Grande parte dos edifícios do parque escolar português estão desprovidos de sistemas de climatização ativa, por motivos económicos, sendo o conforto no interior dos compartimentos é melhorado com recurso a soluções passivas de ventilação e sombreamento. No entanto, estes edifícios não garantem as condições de conforto térmico, nem de qualidade do ar interior, atualmente exigidas. Por diferenciação da restante tipologia de edifícios escolares, os edifícios universitários destacam-se pela presença de sistemas de climatização ativa nos compartimentos onde decorrem as atividades letivas. O que se reflete num aumento continuado dos consumos de energia deste tipo de edifícios em Portugal.

Assim a utilização de energias renováveis para climatização dos espaços e produção de energia a ser consumida pelo sistema de iluminação e elétrico, torna-se um conceito atrativo.

A figura 7.1 esquematiza as simulações feitas neste trabalho:

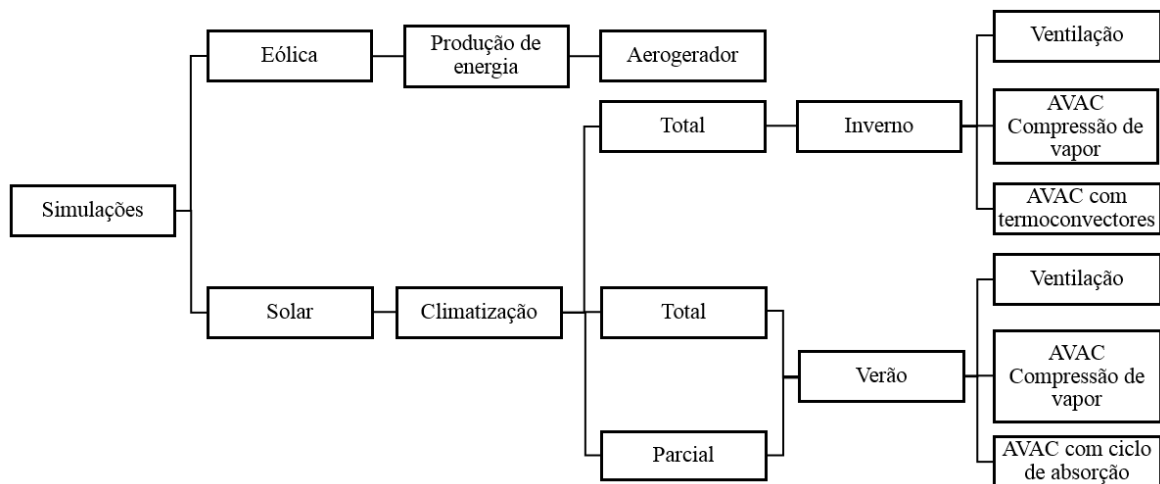


Figura 7.1: Esquema ilustrativo das simulações efetuadas na dissertação.

7.1.Eólica

No mesmo edifício será também estudada a aplicação de um dispositivo concentrador e defletor do fluxo de ar de forma a maximizar a energia produzida por uma turbina eólica.

Para tal foi desenvolvida a equação de um parabolóide hiperbólico (figura 7.2) a partir da equação geral 7.1:

$$f(x, y) = \frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2} \quad (7.1)$$

A partir da equação 7.1, foi desenvolvida a equação 7.2:

$$f(x, y) = \frac{(x^2 - y^2)}{5} \quad (7.2)$$

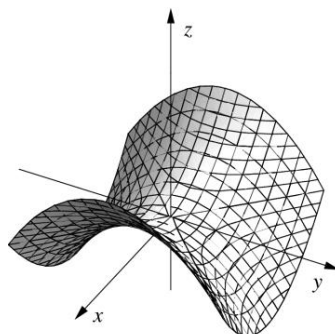


Figura 7.2: Representação genérica de um parabolóide hiperbólico.

[Fonte: <http://www.diale.org/quadricas.html>]

Assim, a partir desta equação foi desenhado, através de um sistema de desenho 3D assistido por computador, um dispositivo concentrador e defletor do fluxo de ar de forma a maximizar a energia produzida por uma turbina eólica (figura 7.3). Este tem 10x10m de dimensão. Este sistema poderá ser utilizado quer no topo de um edifício quer numa zona térrea onde as condições sejam favoráveis. Na situação particular do caso de estudo o dispositivo ficará situado na base do edifício uma vez que no topo serão instalados coletores solares para climatização. A energia elétrica produzida pela turbina eólica será utilizada para iluminação dos compartimentos do edifício e aparelhos elétricos.

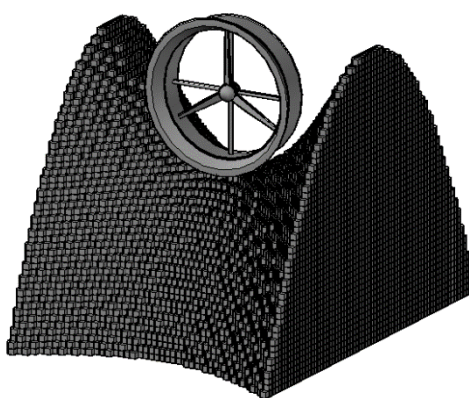


Figura 7.3: Dispositivo de concentração e aceleração do escoamento.

7.2.Solar

O estudo centra-se no edifício do Complexo Pedagógico (junção dos edifícios 3 e 4) pertencente ao campus de Gambelas da Universidade do Algarve (figura 7.4). O edifício é constituído por 125 superfícies transparentes, 1550 superfícies opacas e 107 compartimentos distribuídos entre um piso térreo e dois andares superiores (figuras 7.4, 7.6 e 7.7), onde decorrem atividades letivas. A numeração dos compartimentos do edifício foi feita para tornar possível a identificação da sua localização, orientação, volume, ser-lhes atribuído um sistema de ventilação e definido o regime de ocupação (figuras 7.4, 7.6 e 7.7).

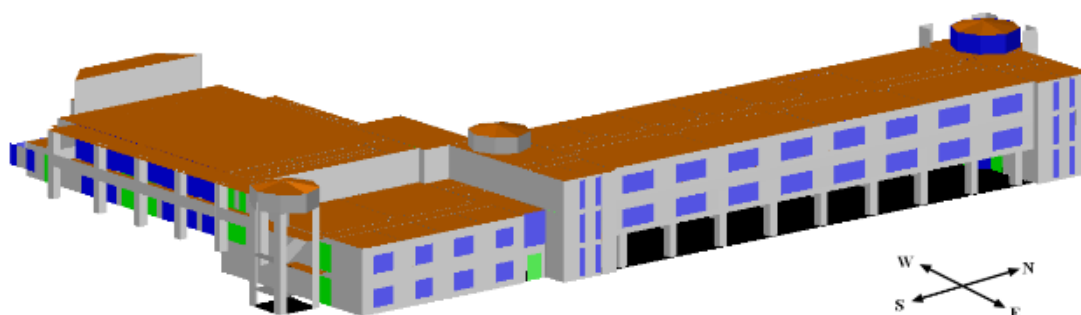


Figura 7.4: Desenho assistido por computador representando o edifício de estudo, Complexo Pedagógico, pertencente ao campus de Gambelas da Universidade do Algarve.

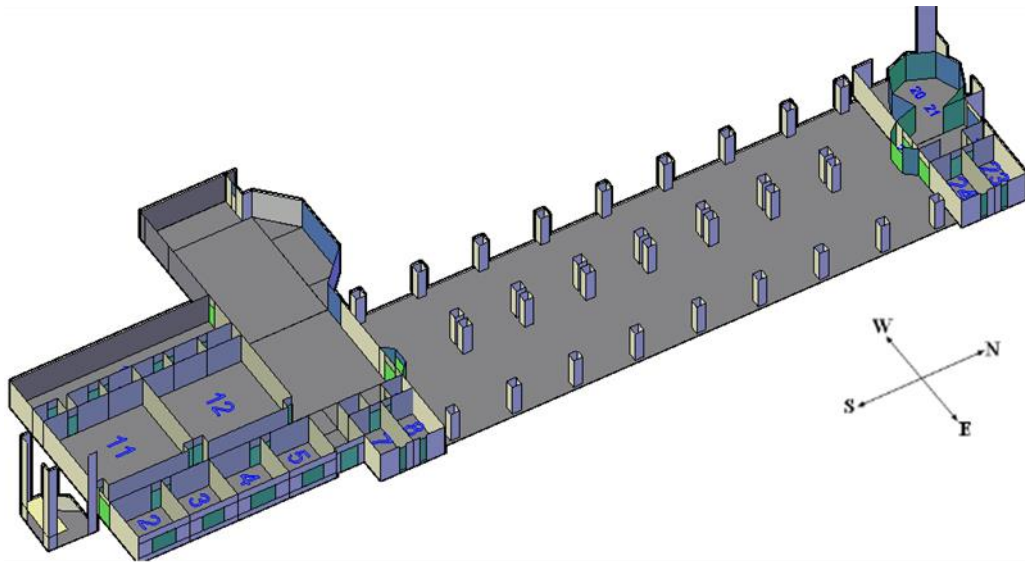


Figura 7.5: Desenho assistido por computador representando a vista isométrica sudeste do piso térreo do edifício do Complexo Pedagógico, pertencente ao campus de Gambelas da Universidade do Algarve.

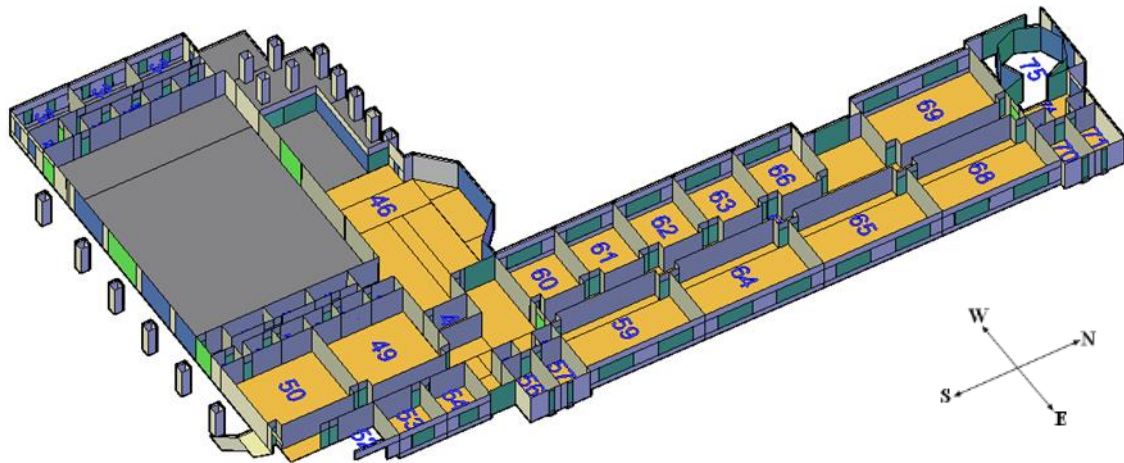


Figura 7.6: Desenho assistido por computador representando a vista isométrica sudeste do 1º piso do Complexo Pedagógico, pertencente ao campus de Gambelas da Universidade do Algarve.

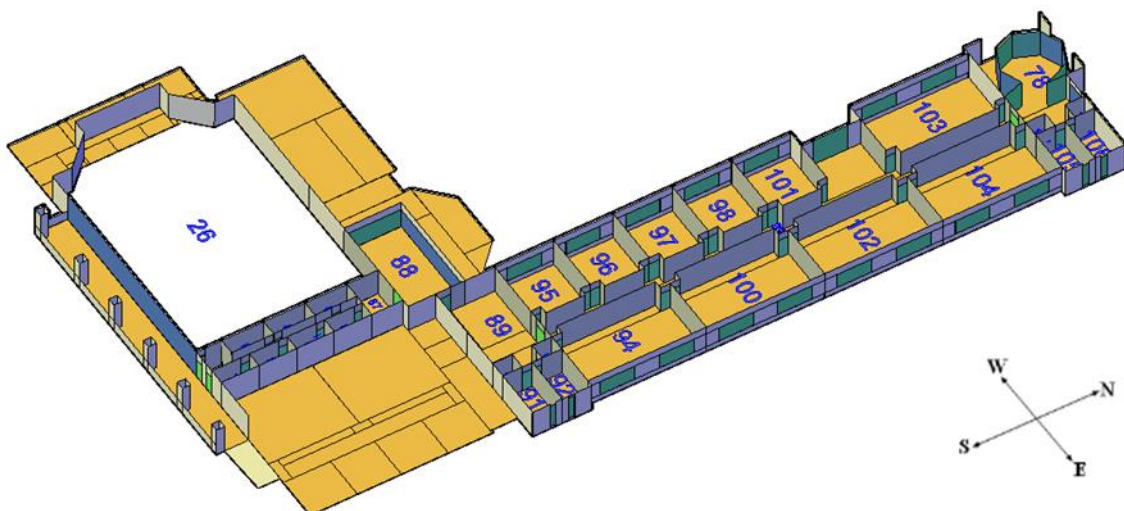


Figura 7.7: Desenho assistido por computador representando a vista isométrica sudeste do 2º piso do Complexo Pedagógico, pertencente ao campus de Gambelas da Universidade do Algarve.

Entre os compartimentos encontram-se salas de aula, anfiteatros, um auditório, gabinetes de apoio às atividades letivas, lavabos, arrecadações e zonas de passagem, com diferentes volumes e orientações solares. O estudo irá residir apenas nos compartimentos que possuem sistema de climatização ativa. Na tabela 7.1 apresenta-se a numeração atribuída aos compartimentos, a sua localização no edifício e a sua função, no caso das salas apresenta-se a orientação solar das áreas envidraçadas.

Tabela 7.1: Numeração dos compartimentos climatizados no interior do Complexo Pedagógico, pertencente das zonas envidraçadas, campus de Gambelas da Universidade do Algarve.

Piso	Salas		Anfiteatros	Grande Auditório	Serviços técnicos
	Oeste	Este	Interior	Sul	Este
Térreo	-	2, 3, 4, 5	11, 12	-	-
1º piso	60, 61, 62, 63, 66, 69	59, 64, 65, 68	49, 50	26	51, 52, 53, 54
2º piso	95, 96, 97, 98, 101, 103	94, 100, 102, 104	-		-

Relativamente à exposição solar do edifício, o sol nasce a Este aquecendo a parede correspondente, ao longo do dia incide mais intensamente nas paredes orientadas a Sul e a Este e pôr-se-á a Oeste do edifício.

A simulação, feita com recurso ao programa *Efficient Buildings*. Do total de compartimentos que constituem o edifício apenas 33 são climatizados. Destes foram selecionados 7 representativos da totalidade de forma a possibilitar uma análise mais pormenorizada dos parâmetros de controlo em cada um deles. Assim foram selecionados os seguintes compartimentos:

- um anfiteatro;
- o grande auditório;
- um gabinete dos serviços técnicos;
- quatro salas:
 - uma pequena e uma grande orientadas a Este;
 - uma média e uma grande orientadas a Oeste.

São apresentados resultados de três simulações:

- Inverno:
 - com climatização e ocupação totais dos compartimentos (máximo);
- Verão:
 - com climatização e ocupação totais dos compartimentos (máximo);
 - com climatização e ocupação parciais dos compartimentos (realista).

São estudados dois sistemas de ar-condicionado, nomeadamente o sistema de compressão a vapor que consome energia elétrica fornecida pela rede, e o ciclo de absorção que consome energia produzida através do sistema de coletores solares. São também simuladas as condições no interior dos compartimentos sem climatização (apenas com ventilação), esta simulação funciona como referência, para verificar as melhorias induzidas pela utilização dos sistemas de climatização.

No programa foram inseridos dados de entrada relativos ao volume dos compartimentos à taxa de ocupação dos compartimentos ao longo do dia, foi selecionado tipo de ventilação, a taxa de ventilação, selecionado o tipo de controlo e as condições de simulação de verão ou inverno. Foram também inseridos dados geográficos, ambientais, corporais, pessoais e relativos aos compartimentos, ao espaço e à radiação. A tabela 7.2 sumariza os dados de entrada no programa.

Os dados de saída analisados foram o valor da radiação incidente nos coletores solares, a temperatura do fluido no depósito, as horas de desconforto (por frio de inverno, por calor de verão), a concentração de dióxido de carbono no interior dos compartimentos, o consumo de energia por parte dos sistemas de ar-condicionado e os valores de PMV sentidos pelos ocupantes dos compartimentos estudados.

A parede Este do edifício é a mais exposta à radiação solar durante o dia e possui uma grande área de superfícies transparentes que irão contribuir diretamente com ganhos térmicos no interior dos compartimentos, tanto de inverno como de verão.

Tabela 7.2: Dados de entrada inseridos no programa *Efficient Buildings*.

Tipologia	Parâmetro	Verão	Inverno
Geográficas	Dia	22/6	22/12
	Latitude [°]	Faro : 39	
Ambientais	Ângulo de incidência do vento [°]	-1.2	-109.2
	Concentração de CO ₂ [kg/m ³]	0.0005	
Corpo Humano	Massa corporal [kg]	70	
	Altura Corporal [m]	1.70	
	Área corporal [m ²]	1.805483	
	H ₂ O gerado corporalmente [mg/m ³]	8.3 x 10 ⁻⁶	
	CO ₂ gerado corporalmente [mg/m ³]	8.8 x 10 ⁻⁶	
	Vestuário [clo]	0.5	1
	Taxa metabólica [met]	70	
Compartimentos	Temperatura do ar nos espaços [°C]	25	20
	Temperatura dos corpos opacos [°C]	25	20
	Temperatura das superfícies transparentes [°C]	25	20
	Temperatura dos corpos interiores [°C]	25	20
	Massa de vapor nas superfícies [kg]	0.001	
	Massa de vapor absorvido [kg]	0	
	Temperatura dos tubos [°C]	18	
	Temperatura do ar nos tubos [°C]	18	
	Temperatura da Terra [°C]	18	
Espaços	Densidade (ρ_{ar}) [kg/m ³]	1.1614	
	Cp _{ar} [J/(kg.K)]	1007	
	Condutibilidade _{ar} (W/m ² /°C)	0.0263	
	Expansão (γ)	0.00333	
	Viscosidade (m ² /s)	1.581 x 10 ⁻⁶	
	Prandtl	0.7	
	Volume [m ³]	1 x 10 ⁶	
	Coeficiente da leitura da radiação [%]	1	
	Coeficiente da caixilharia das janelas [%]	0.75	
	Coeficiente da emissão das janelas [%]	0.85	
	Coeficiente de absorção das paredes exteriores [%]	0.5	
	Coeficiente de absorção das paredes interiores [%]	0.5	
	Coeficiente de emissão das paredes [%]	0.85	

A radiação solar, direta e difusa, incidente no edifício foi determinada numericamente, a partir de um conjunto de equações empíricas presentes em Iqbal (1983). Os dados foram recolhidos através de uma estação meteorológica instaladas nas imediações do edifício

nos dias 22 de dezembro e 19 de junho de 2005, respetivamente. Foi feita uma simulação de 5 dias com objetivo de obtenção de inércia térmica no edifício e consequente estabilização dos resultados. A análise feita terá apenas em consideração as últimas 24 horas do quinto dia de simulação, com os resultados já estabilizados.

A aplicação do modelo numérico, *Efficient Buildings*, permitiu simular o comportamento térmico do edifício, incluindo o sistema de ar-condicionado solar com ciclo de absorção usando o par amoníaco-água. Com este estudo pretendeu-se simular a utilização de 598 coletores solares de vácuo (dimensões $2\text{m} \times 1.1\text{m}$) instalados no telhado do edifício de estudo (figura 7.8) para fornecer calor ao sistema de Aquecimento Ventilação e Ar-Condicionado (AVAC), em condições de verão e inverno. Os coletores são colocados justapostos de forma a perfazerem fileiras. A água aquecida nos coletores é distribuída ao longo do edifício através de um sistema de condutas isoladas termicamente. A climatização das salas é feita através de termoconvectores instalados no teto.

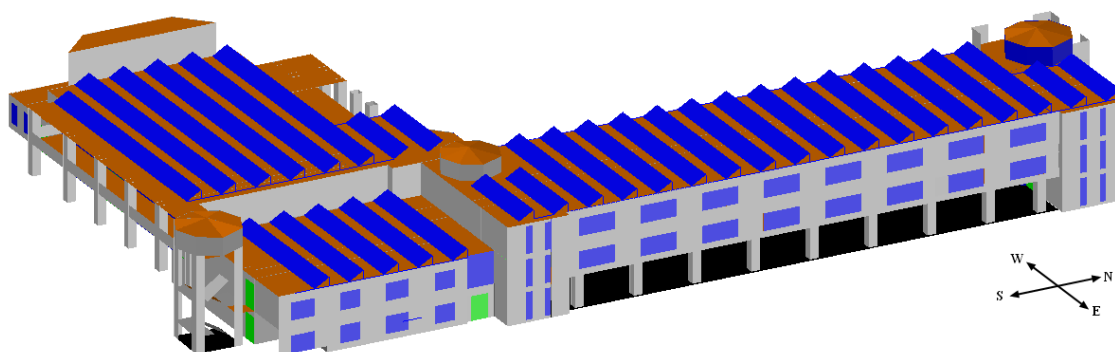


Figura 7.8 Desenho assistido por computador representando edifício do Complexo Pedagógico da Universidade do Algarve, campus de Gambelas, com coletores solares instalados no telhado.

Em condições de verão é simulada a aplicação de coletores solares térmicos de vácuo conectados a um sistema de ar-condicionado por ciclo de absorção responsável pelo arrefecimento dos compartimentos (ver figura 7.9).

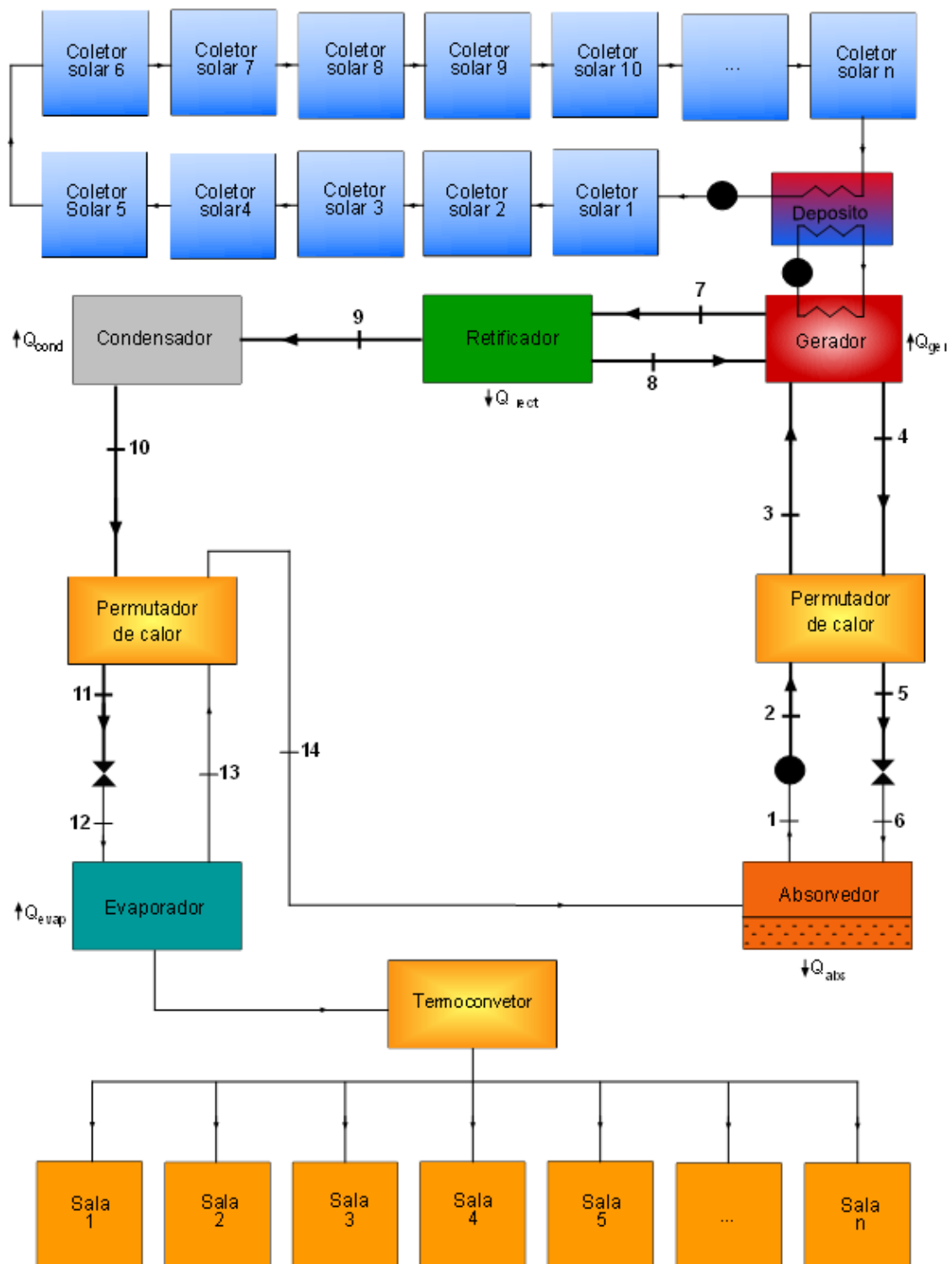


Figura 7.9: Esquema da climatização dos compartimentos na situação de verão.

Em condições de inverno foi considerada apenas a utilização de coletores térmicos de vácuo com a função de aquecer a água, que será distribuída pelo edifício através de um sistema de condutas e fornecerá calor ao interior dos compartimentos através de termoconvectores (ver figura 7.10).

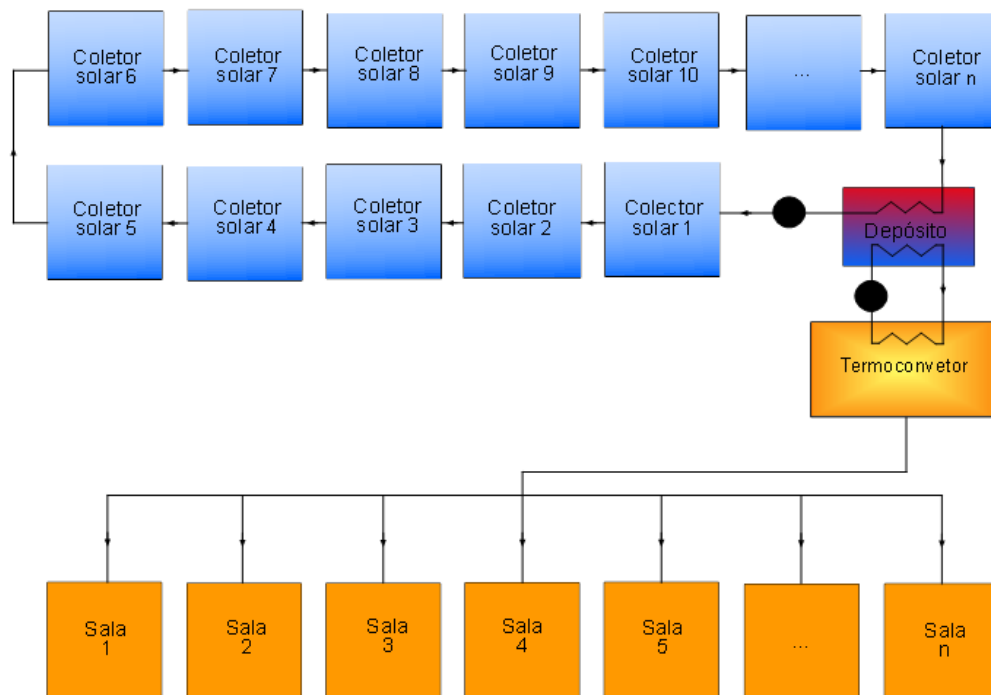


Figura 7.10: Esquema da climatização dos compartimentos na situação de inverno.

A seleção do coletor foi feita tendo em conta que os sistemas por ciclo de absorção $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$ requerem temperaturas no gerador superiores a 120°C , que não conseguem ser atingidas com coletores do tipo CPC.

Para a seleção do coletor a utilizar na simulação foram comparados vários coletores existentes no mercado e selecionado o que apresenta melhor desempenho (figura 7.11). Na figura 7.11 estão representados a tracejado os coletores solares de vácuo, a traço fino os coletores planos e a traço espesso os coletores do tipo CPC.

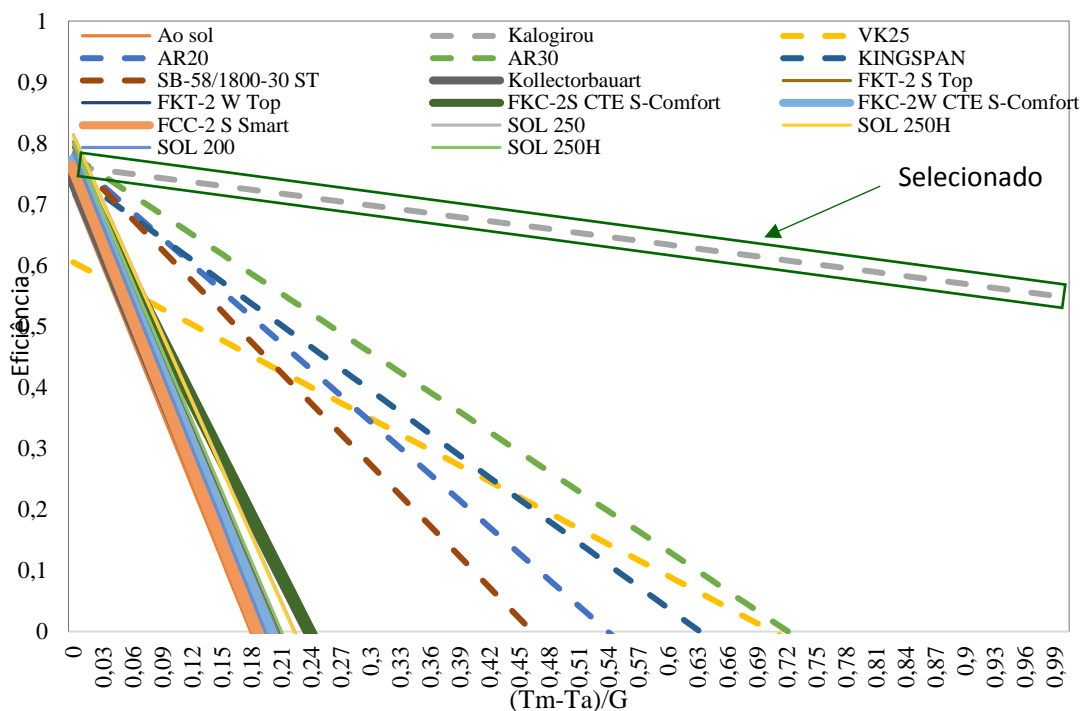


Figura 7.11: Comparação do desempenho de vários coletores solares existentes no mercado.

O coletor que apresenta um melhor desempenho, e conseqüente o selecionado para a simulação é o coletor a vácuo com as características descritas em Kalogirou (2004).

Será feita a avaliação da qualidade do ar e dos níveis de conforto no interior dos compartimentos que possuem sistema de climatização ativa, tanto em condições de verão como de inverno. Para tal será utilizado o índice PMV (baseado nos valores da temperatura, velocidade e humidade relativa do ar, da temperatura média radiante, do nível de vestuário e do nível de atividade física), o nível de CO₂ e as horas de desconforto por calor, na estação de verão, e por frio na estação de inverno.

Foi tida em consideração uma análise feita ao ciclo de ocupação dos compartimentos ao longo do dia relativamente à duração dos períodos letivos e ao número de ocupantes. Salienta-se que o edifício de estudo encontra-se construído e plenamente funcional, e sendo assim as propostas feitas terão apenas como objetivo melhorar os consumos energéticos e as condições conforto já existentes.

Os regimes de ocupação e de climatização total dos compartimentos são respetivamente apresentados nas tabelas 7.3 e 7.4. Considera-se que o sistema AVAC liga e desliga conforme o espaço está ocupado ou desocupado.

Tabela 7.3: Regime de ocupação total dos compartimentos.

Nº	Compartimentos	00:00	08:30	10:00	10:25	11:45	12:00	13:30	13:45	15:15	15:30	17:00	17:15	18:45
		– 08:30	– 10:00	– 10:25	– 11:45	– 12:00	– 13:30	– 13:45	– 15:15	– 15:30	– 17:00	– 17:15	– 18:45	– 00:00
11, 12, 49, 50	Anfiteatro	0	50	0	50	0	50	0	50	0	50	0	50	0
26	Grande auditório	0	105	105	105	105	0	0	105	105	105	0	0	0
2, 3, 4, 5	Salas Pequenas	0	15	0	15	0	15	0	15	0	15	0	15	0
60, 61, 62, 63, 66, 96, 97, 98, 100, 102	Salas Médias	0	20	0	20	0	20	0	20	0	20	0	20	0
59, 64, 65, 68, 69, 95, 101, 103, 104	Salas Grandes	0	40	0	40	0	40	0	40	0	40	0	40	0

Tabela 7.4: Regime de climatização total dos compartimentos.

Nº	Compartimentos	00:00	08:30	10:00	10:25	11:45	12:00	13:30	13:45	15:15	15:30	17:00	17:15	18:45
		– 08:30	– 10:00	– 10:25	– 11:45	– 12:00	– 13:30	– 13:45	– 15:15	– 15:30	– 17:00	– 17:15	– 18:45	– 00:00
11, 12, 49, 50	Anfiteatro	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF
26	Grande auditório	OFF	ON	ON	ON	ON	OFF	OFF	ON	ON	ON	OFF	OFF	OFF
2, 3, 4, 5	Salas Pequenas	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF
60, 61, 62, 63, 66, 96, 97, 98, 100, 102	Salas Médias	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF
59, 64, 65, 68, 69, 95, 101, 103, 104	Salas Grandes	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF

Apresenta-se também uma situação mais próxima da realidade onde se efetuou uma redução do número de compartimentos ocupados, o número de ocupantes por compartimento e o tempo que os ocupantes ocupavam os compartimentos sendo que os compartimentos localizados a Oeste foram ocupados durante o período da manhã e os compartimentos a Este foram ocupados da parte da tarde. Os regimes de ocupação e de climatização parciais dos compartimentos são respetivamente apresentados nas tabelas 7.5 e 7.6.

Tabela 7.5: Regime de ocupação parcial dos compartimentos.

Nº	Compartimentos	00:00	08:30	10:00	10:25	11:45	12:00	13:30	13:45	15:15	15:30	17:00	17:15	18:45
		– 08:30	– 10:00	– 10:25	– 11:45	– 12:00	– 13:30	– 13:45	– 15:15	– 15:30	– 17:00	– 17:15	– 18:45	– 24:00
2, 4	Sala pequena (E)	0	0	0	0	0	10	0	10	0	10	0	10	0
11, 49	Anfiteatro	0	0	0	0	0	0	0	25	0	25	0	25	0
26	Grande auditório	0	105	105	105	105	0	0	0	0	0	0	0	0
59, 68, 94, 104	Sala Grande (E)	0	0	0	0	0	0	0	25	0	25	0	25	0
60, 62, 95, 97, 101	Sala Média (W)	0	15	0	15	0	15	0	0	0	0	0	0	0
69, 103	Sala Grande (W)	0	25	0	25	0	25	0	0	0	0	0	0	0

Tabela 7.6: Regime de climatização parcial dos compartimentos.

Nº	Compartimentos	00:00	08:30	10:00	10:25	11:45	12:00	13:30	13:45	15:15	15:30	17:00	17:15	18:45
		– 08:30	– 10:00	– 10:25	– 11:45	– 12:00	– 13:30	– 13:45	– 15:15	– 15:30	– 17:00	– 17:15	– 18:45	– 24:00
2, 4	Sala pequena (E)	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF
11, 49	Anfiteatro	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF
26	Grande auditório	OFF	ON	ON	ON	ON	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF
59, 68, 94, 104	Sala Grande (E)	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF
60, 62, 95, 97, 101	Sala Média (W)	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF
69, 103	Sala Grande (W)	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF

A cada compartimento é aplicado uma taxa de ventilação em função do número de ocupantes (ver tabela 7.7).

Tabela 7.7: Taxa de ventilação aplicada aos compartimentos com ocupação.

Nº	Compartimentos	00:00	08:30	10:00	10:25	11:45	12:00	13:30	13:45	15:15	15:30	17:00	17:15	18:45
		– 08:30	– 10:00	– 10:25	– 11:45	– 12:00	– 13:30	– 13:45	– 15:15	– 15:30	– 17:00	– 17:15	– 18:45	– 00:00
11, 12, 49, 50	Anfiteatro	0	0,49	0	0,49	0	0,49	0	0,49	0	0,49	0	0,49	0
26	Grande auditório	0	1,02	1,02	1,02	1,02	0	0	1,02	1,02	1,02	0	0	0
2, 3, 4, 5	Salas Pequenas	0	0,15	0	0,15	0	0,15	0	0,15	0	0,15	0	0,15	
60, 61, 62, 63, 66, 96, 97, 98, 100, 102	Salas Médias	0	0,19	0	0,19	0	0,19	0	0,19	0	0,19	0	0,19	0
59, 64, 65, 68, 69, 95, 101, 103, 104	Salas Grandes	0	0,39	0	0,39	0	0,39	0	0,39	0	0,39	0	0,39	0

8. Resultados

Nesta secção serão apresentados alguns resultados obtidos. Os resultados serão divididos em dois subcapítulos dedicados à energia eólica e solar.

Relativamente à simulação eólica serão apresentados e discutidos os resultados referentes ao estudo da aplicação de um dispositivo concentrador e defletor do escoamento para produção de energia.

Em relação à simulação solar são apresentados e discutidos os resultados obtidos com as simulações numéricas referentes ao estudo da aplicação de coletores solares no edifício do Complexo Pedagógico para climatizar os compartimentos em situações de verão e de inverno.

Em condições de verão é simulada a utilização de coletores solares de vácuo que aquecerão água de forma fornecer calor ao sistema de ar-condicionado com ciclo de absorção que utiliza como fluxo de trabalho o par amoníaco-água para que este produza frio no interior dos compartimentos do edifício.

Em condições de inverno é simulada a utilização de coletores solares de vácuo que serão usados para aquecer os espaços diretamente através de um sistema de condutas.

8.1. Eólica

A simulação foi feita utilizando o modelo *Computational Fluid Dynamics* (CFD).

A figura 8.1 ilustra as diferentes perspetivas do comportamento do escoamento no dispositivo concentrador e defletor do fluxo de ar, através de vetores de velocidade. A figura 8.1 demonstra que o dispositivo efetua concentração, aceleração e direcionamento do escoamento que a montante do dispositivo assume valores de 1 m/s. Verifica-se também a formação de vórtices no rasto a jusante do dispositivo, que se mantêm na parte inferior do dispositivo.

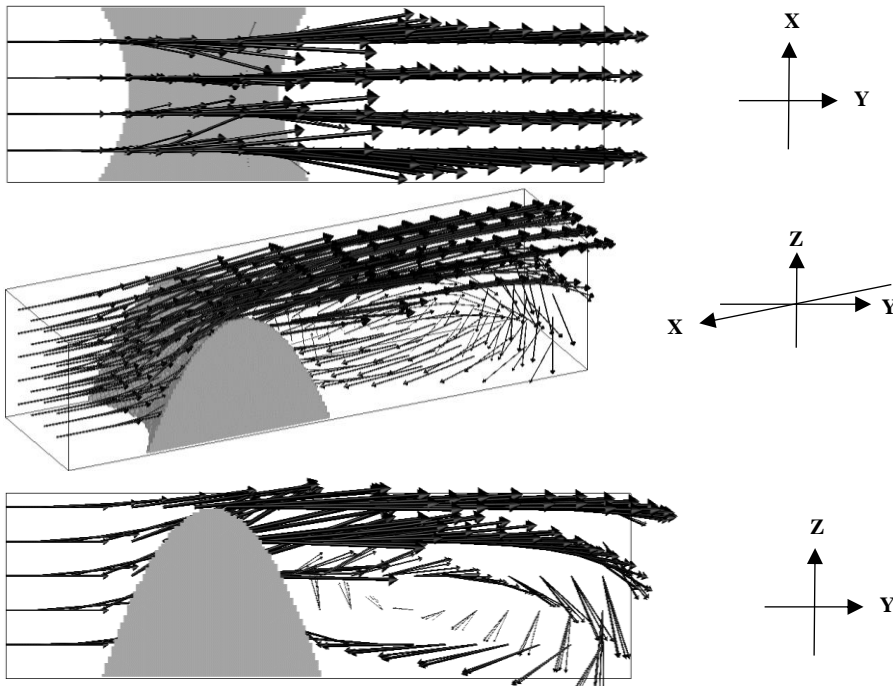


Figura 8.1: Campo vetorial da velocidade do ar ao passar pelo dispositivo de concentração e aceleração do escoamento (a) vista de topo, plano xy , (b) vista lateral, plano xyz (c) vista isométrica, plano yz .

Na figura 8.2 estão representadas as isolinhas de velocidade do vento do plano lateral xz no centro dispositivo. É nesta zona onde o escoamento se concentra e atinge a velocidade máxima de 10,5 m/s. Consequentemente, é também nesta zona que deverá ser instalado o aerogerador, de forma a maximizar a produção de energia.

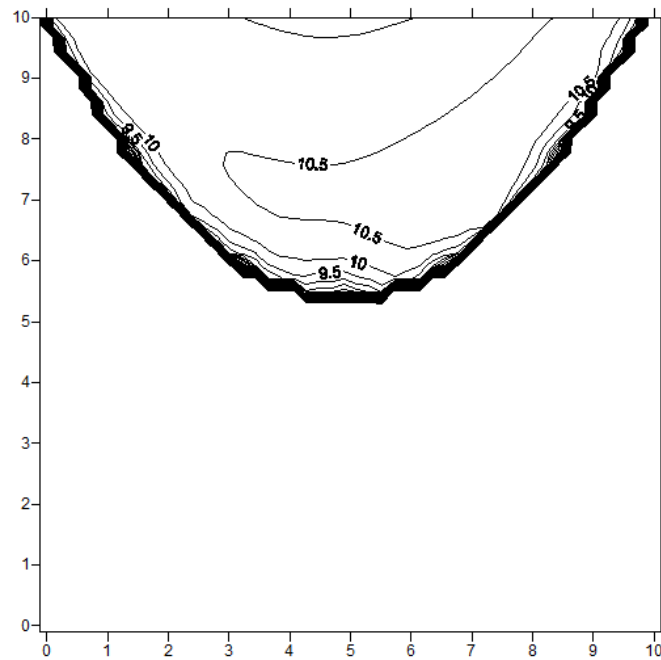


Figura 8.2: Representação do campo da velocidade do ar no plano xz da zona central.

Analisaram-se vários modelos de turbinas eólicas de pequena escala com potencial de serem aplicadas em ambiente urbano e a que demonstrou ter as características que melhor se adaptam à aplicação no caso de estudo foi o Aeroerador Urbano donQi – 1,75 KW (figura 8.3).



Figura 8.3: Aeroerador urbano donQi 1,75 kW.

[Fonte: <http://transfer-lbc.com/nl/776/spanje-biedt-nog-steeds-kansen-voor-duurzame-energiesector.html>]

Para a velocidade máxima do escoamento de 10,5 m/s obtida com a utilização do dispositivo de concentração simulou-se a energia produzida pelo aerogerador urbano donQi 1,75 kW (figura 8.4).

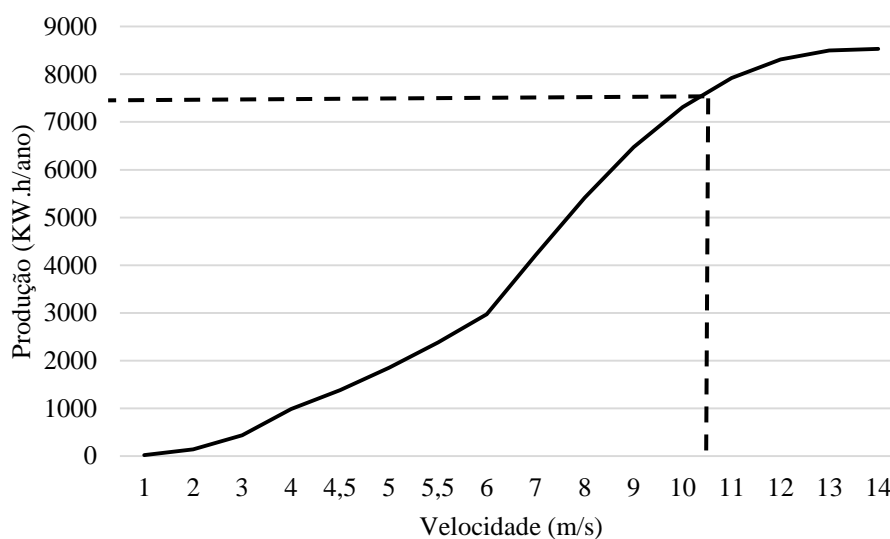


Figura 8.4: Curva de produção anual da turbina donQi 1,75 KW em função da velocidade do vento.

Assim verifica-se que com a utilização combinada desta turbina com o dispositivo, para velocidades de 10,5m/s, é possível obter produções anuais na ordem dos 7500 KW.h, ou seja, aproximadamente 20,5 KW.h por dia, energia essa a ser utilizada pelo sistema elétrico do edifício.

O edifício de estudo é composto por:

- Quatro gabinetes;
- Quatro salas pequenas;
- Dez salas médias;
- Dez salas grandes;
- Quatro anfiteatros;
- Um grande auditório.

Na tabela 8.1 apresenta-se o consumo estimado do sistema elétrico e de iluminação dos diferentes compartimentos do edifício de estudo.

Tabela 8.1: Estimativa do consumo do sistema elétrico e de iluminação nos diferentes compartimentos do edifício de estudo.

Compartimento	Consumo total dos compartimentos							
	Iluminação				Computadores			
	Número de lâmpadas	Potência (KW)	Nº de horas/dia	Consumo (KW.h/dia)	Nº de computadores	Potência (KW)	Nº de horas/dia	Consumo (KW.h/dia)
Sala pequena	32	0,032	6	6,144	-	-	-	-
Sala média	120	0,032	4,5	17,280	-	-	-	-
Sala grande	240	0,032	4,5	34,560	-	-	-	-
Anfiteatro	184	0,005	4,5	4,140	-	-	-	-
Gabinete	32	0,032	8	8,192	8	0,3	8	19,2
Grande Auditório	58	0,005	5	1,450	-	-	-	-
SubTotal	-	-	-	71,766	-	-	-	19,2
Total Edifício	90,966							

Através da tabela 8.1 é possível verificar que o consumo total estimado do edifício é 90,966 KW.h/dia. Este valor é muito superior à energia produzida pelo sistema eólico 20,5 KW.h/dia, assim a utilização do sistema eólica não produz energia suficiente para as necessidades elétricas totais do edifício, no entanto possui energia suficiente para fornecer a 8 computadores de 0,3 KW que trabalhem 8 horas diárias, e o excedente poderá ser utilizado para outros pequenos equipamentos elétricos. Sugere-se portanto, que no período diurno seja tirado o máximo partido da iluminação natural, sempre que possível.

8.2. Solar

8.2.1. Inverno

Durante o Inverno, devido aos reduzidos valores da temperatura do ar no ambiente exterior, o sistema de ar-condicionado é utilizado para fins de aquecimento. É simulada a utilização de coletores solares que aquecerão a água e através de um sistema de condutas, será distribuída pelo edifício e fornecerá calor ao interior dos compartimentos através de termoconvectores.

A simulação de inverno é feita com os regimes de ocupação e climatização totais dos compartimentos.

Radiação solar

Um dos fatores importantes a ter em consideração é quantidade de radiação incidente nos coletores instalados no topo do edifício de estudo, uma vez que quanto maior for a radiação incidente mais energia será convertida em calor para climatizar as salas.

Para o cálculo da área dos coletores solares foi considerado a soma da área total de coletores instalados numa fileira. No total são considerados 598 coletores de 2 m² cada, os coletores são justapostos perfazendo 31 fileiras, com quatro áreas diferentes: 21.5 m², 37.2 m², 59.3 m², 65.4m² (figura 8.5).

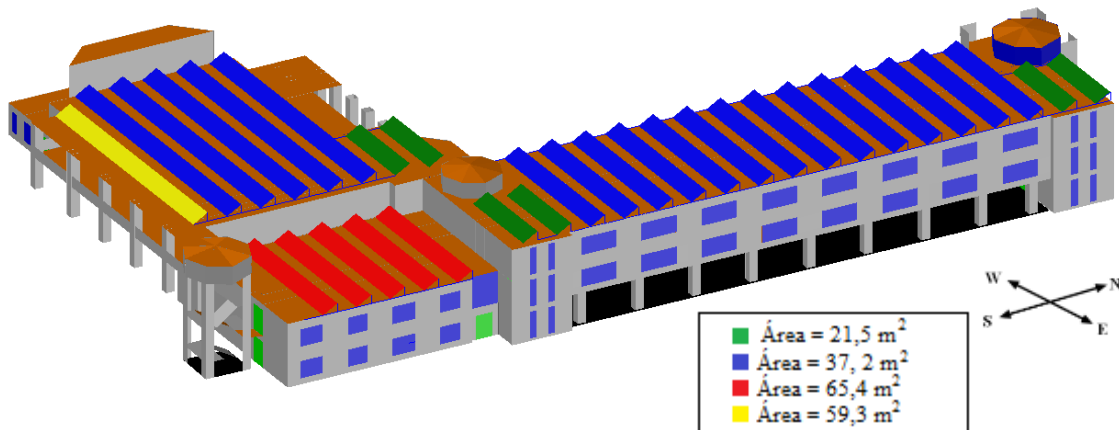


Figura 8.5: Diferentes áreas de fileiras de coletores, consideradas no topo do edifício de estudo.

Assumindo que, uma vez que estão instalados no topo do edifício, não há sombreamentos de outros edifícios em redor e que foi respeitada a distância mínima entre fileiras para que não haja sombreamentos, foram escolhidas quatro áreas de fileiras diferentes para serem representadas. As horas simuladas são horas em tempo solar ou seja, estão representadas as horas que marcaria um relógio solar no dia de simulação. Na figura 8.6 apresentam-se os valores da radiação por m^2 de área de coletor.

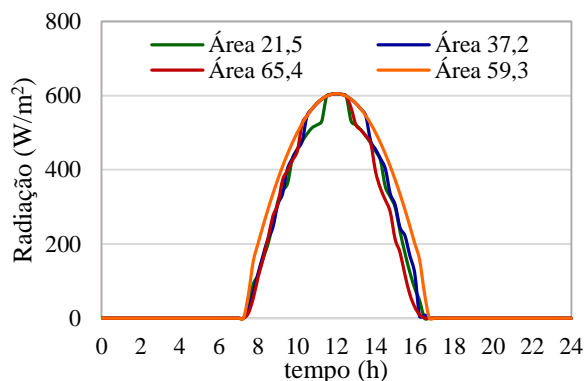


Figura 8.6: Radiação incidente nas diferentes áreas de fileiras de coletores solares, em condições de inverno.

De acordo com os resultados obtidos é possível verificar que:

- Apesar de terem sido consideradas diferentes áreas de coletores, como o cálculo é feito em função da área, os valores da radiação são bastante semelhantes;
- Ocorre um crescimento uniforme desde o momento em que o sol nasce até ao meio-dia;
- O pico de radiação solar é atingido aos $600W/m^2$, a partir daí verifica-se um decaimento da radiação até ao pôr-do-sol;
- O período diurno consiste em aproximadamente 10 horas de luz solar.

Relativamente à radiação incidente na parede Este do edifício, este possui uma grande área de envidraçados de forma a melhorar as condições de iluminação natural nos compartimentos. Estes desempenham um papel importante balanço térmico do edifício, através da adição de cargas térmicas, quer de inverno quer de verão. A radiação ao incidir sobre uma superfície exterior é absorvida, aumentando o fluxo de calor aumentando o diferencial de temperatura entre o interior e o exterior. De inverno significará que o sistema irá consumir menos energia pois a radiação contribuirá naturalmente para o aquecimento dos compartimentos fazendo com que não seja necessário acionar o sistema de ar-condicionado durante tanto tempo para atingir as condições de conforto.

Temperatura do fluido do depósito

Durante o inverno foi estudada a utilização de coletores solares que aquecerão a água, e fornecerão calor ao interior dos compartimentos através de um sistema de condutas. Os coletores solares absorvem a radiação e transferem a energia sob forma de calor para o fluido. Numa situação em que a disponibilidade de calor não corresponder à necessidade este deverá ser acumulado num depósito e aí ficar armazenado até ser necessário. Através da temperatura do fluido no interior do depósito, apresentada na figura 8.7, é possível ter uma perceção da quantidade de calor fornecida ao sistema de condutas, que será distribuído pelos compartimentos.

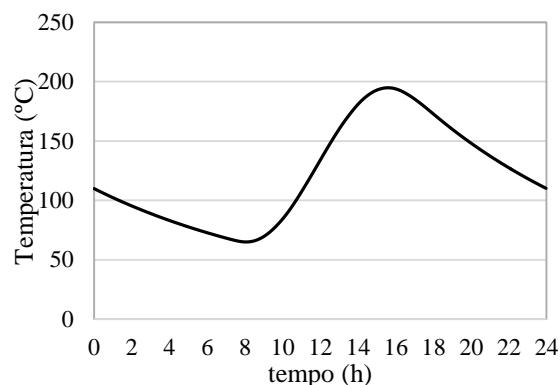


Figura 8.7: Evolução ao longo do dia da temperatura do fluido armazenado no depósito em condições de inverno.

É possível verificar, através da figura 8.7, que:

- A temperatura máxima atingida no depósito é de cerca de 200°C às 15h;
- Existe um desfasamento normal face ao pico da radiação, uma vez que os coletores necessitam de tempo para transferir a energia ao fluido.

Horas de desconforto por frio

Através do cálculo das horas de desconforto por frio (HDF) torna-se possível avaliar o nível de desconforto sentido pelos ocupantes nos compartimentos. Através deste parâmetro é possível determinar e o período de tempo em que as condições ambientais de um espaço ocupado estão fora da zona de conforto. Este parâmetro não é linear, varia conforme a quantidade de frio sentido pelo ocupante e está associado a um fator de ponderação.

É o desconforto com as condições térmicas e com a qualidade do ar que determinam a necessidade dos ocupantes recorrerem ao sistema de climatização, no caso do inverno, de forma a anular as perdas térmicas. Os valores das horas de desconforto por frio obtidas na simulação de inverno são apresentados na tabela 8.2.

Tabela 8.2: Simulação de inverno representando as horas de desconforto por frio sentidas pelos ocupantes nas situações em que apenas há ventilação, com sistema AVAC com coletores e termoconvectores, de todos os compartimentos do edifício do Complexo Pedagógico, durante os períodos da manhã e da tarde.

Compartimento	Horas de Frio (h)		
	Ventilação	AVAC compressão de vapor	AVAC termoconvectores
Salas	74,0	30,6	43,5
Anfiteatros	13,3	3,3	6,9
Zonas de passagem	508,3	504,5	507,0
Grande Auditório	6,1	2,3	5,9
Serviços técnicos	66,1	26,1	9,6
TOTAL	667,8	566,7	572,9

Através da tabela 8.2 é possível verificar que:

- A utilização de sistema de climatização permite uma diminuição da sensação de frio dos ocupantes;
- As zonas de passagem são os compartimentos onde se contabilizam o maior número de horas de desconforto, entre 76 a 89% das horas totais. Isto deve-se ao facto de estes compartimentos terem ocupação mas não possuem sistema de climatização ativos;
- Comparando o desempenho de ambos os sistemas estudados, conclui-se que o sistema de compressão de vapor permite uma redução das horas desconforto por frio ligeiramente superior ao sistema com coletores e termoconvectores em todos os compartimentos climatizados. Isto acontece porque o sistema AVAC com coletores e termoconvectores não tem tanta energia disponível para converter em calor quanto o sistema compressão de vapor;
- Apesar de o sistema de compressão de vapor apresentar um melhor desempenho na redução das horas de frio considera-se que o desempenho do sistema AVAC com coletores e termoconvectores tem igualmente um bom desempenho.

Apesar de haver radiação menos intensa de inverno, verifica-se que no Algarve, o inverno é pouco rigoroso uma vez que mesmo com o sistema de climatização desligado não são contabilizadas muitas horas de frio, o que implica que o sistema de ar-condicionado não precisa de consumir muita energia para atingir condições confortáveis no interior dos compartimentos. Como foi mencionado anteriormente, a área envidraçada da parede Este contribui para um menor consumo por parte dos sistemas de ar-condicionado durante inverno pois permite adição de cargas térmicas positivas naturalmente aos compartimentos.

Dióxido de Carbono

Em compartimentos com elevadas taxas de ocupação um dos parâmetros de maior importância para aferir a qualidade do ar interior e da eficiência da remoção de poluentes por parte do sistema AVAC é a evolução do nível de concentração de dióxido de carbono (CO_2). A concentração de CO_2 gerado pelos ocupantes dos diferentes espaços varia consoante o número de ocupantes presentes, do seu respetivo metabolismo, do volume do compartimento e da taxa de ventilação a ele aplicada. A concentração máxima de dióxido de carbono permitida em espaços interiores é de 1800 mg/m^3 , valor estabelecido pelo Decreto-Lei nº 79/2006, de 4 de Abril 2006.

Nas figuras 8.8a e 8.8b são apresentados os valores de CO_2 nos compartimentos estudados, para a situação onde há apenas ventilação, com ar-condicionado por compressão de vapor e com AVAC com coletores e termoconvectores.

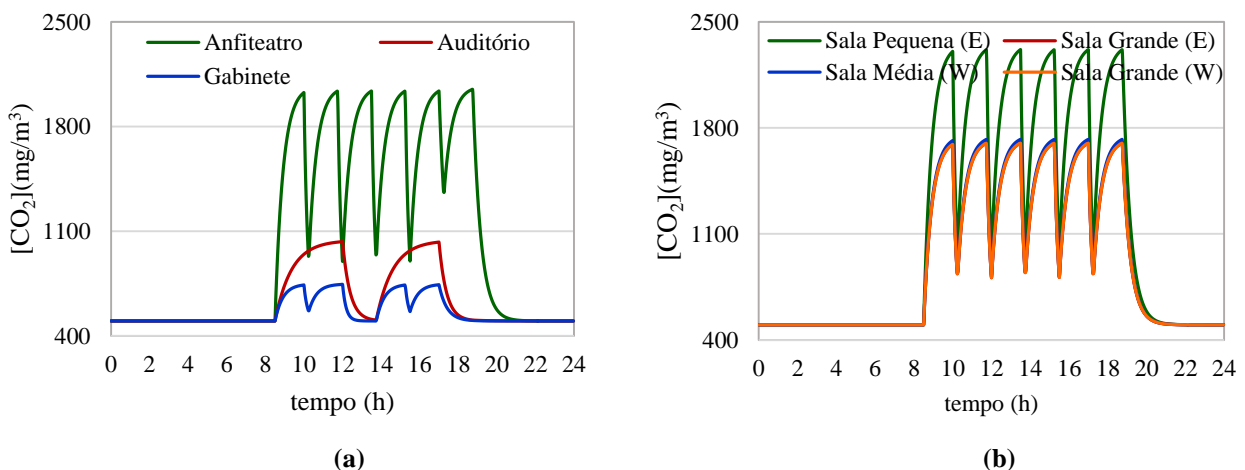


Figura 8.8: Evolução da concentração de dióxido de carbono (CO_2) ao longo do dia no(a): (a) Anfiteatro, Grande Auditório e Gabinete de apoio técnico (b) Sala Pequena (E), Sala Grande (E), Sala Média (W) e Sala Grande (W) do Complexo Pedagógico da Universidade do Algarve, para as situações apenas com ventilação, ar-condicionado por compressão de vapor e ar-condicionado com coletores e termoconvectores, na simulação de inverno.

Os gráficos da concentração de CO_2 apresentam os mesmos valores para ambos os sistemas AVAC estudados bem como para a situação em que existe apenas ventilação. Isto justifica-se pelo facto de a taxa de renovação do ar se ter mantido inalterada e ter sido aplicada a mesma taxa de ocupação.

Através da figura X verifica-se que:

- Em alguns compartimentos, nomeadamente no anfiteatro e na sala pequena orientada a Este, as concentrações de dióxido de carbono assumem valores ligeiramente superiores aos permitidos pela legislação;

- No anfiteatro são atingidos picos de 2030 mg/m³, na sala pequena (E) são atingidos picos de 2300 mg/m³. Isto pode ser indicativo da sobrelotação do espaço ou de uma baixa taxa de ventilação. Apesar de serem ultrapassados os limites impostos pela legislação, o facto de não ser largamente ultrapassado faz com que as condições no interior destes compartimentos sejam toleráveis;
- Nos restantes compartimentos a concentração de dióxido de carbono se mantém inferior aos limites legislados.

Consumo de energia

A insatisfação dos ocupantes com as condições térmicas e com a qualidade do ar determinam a necessidade de recorrerem ao sistema ar-condicionado, em condições de inverno, para anular a sensação de frio. A simulação tornou possível a comparação dos consumos do sistema por compressão de vapor e do sistema com coletores e termoconvectores. Os consumos totais por tipologia de compartimento são apresentados na tabela 8.3.

Tabela 8.3: Simulação de inverno representando os consumos do ar-condicionado por compressão de vapor e com coletores e termoconvectores de todas as salas climatizadas do edifício do Complexo Pedagógico, durante os períodos da manhã e da tarde.

Compartimentos	Consumo (kW.h/dia)	
	AVAC compressão de vapor	AVAC termoconvectores
Salas	76,4	67,0
Anfiteatros	9,4	5,4
Grande auditório	75,1	47,1
Serviços técnicos	13,9	45,8
TOTAL	174,8	165,4

Através da tabela 8.3 pode-se aferir que:

- Os consumos totais de ambos os sistemas, AVAC por compressão de vapor e AVAC com coletores e termoconvectores, são bastante semelhantes;
- Apesar de haver um ligeiro desfasamento, entre o consumo do sistema por compressão de vapor (que é considerado ideal, uma vez que tem sempre disponível energia suficiente para fornecer ao sistema de climatização quando esta é solicitada) e o sistema AVAC com coletores e termoconvectores, a proximidade entre os consumos de ambos os sistemas permite concluir que o

sistema AVAC com coletores e termoconvetores tem energia suficiente para climatizar todos os compartimentos do edifício de estudo.

PMV

Na simulação de inverno o controlo foi feito utilizando o índice do PMV tendo como valor de referência -0,7. Este índice engloba os valores da temperatura do ar, temperatura média radiante, velocidade do ar, humidade relativa, vestuário e nível de atividade metabólica dos ocupantes, e por isso torna-se mais eficiente do que analisar cada um destes parâmetros individualmente. Nos gráficos 8.10a e 8.10b apresentam-se os valores do índice PMV em alguns dos compartimentos climatizados com o sistema por compressão de vapor, e nas figuras 8.11a e 8.11b apresentam-se os resultados do PMV obtidos com o sistema AVAC com coletores e termoconvetores. Foi realizada também uma simulação sem climatização (apenas com ventilação), os resultados do PMV desta situação, são apresentados nos gráficos 8.9a e 8.9b.

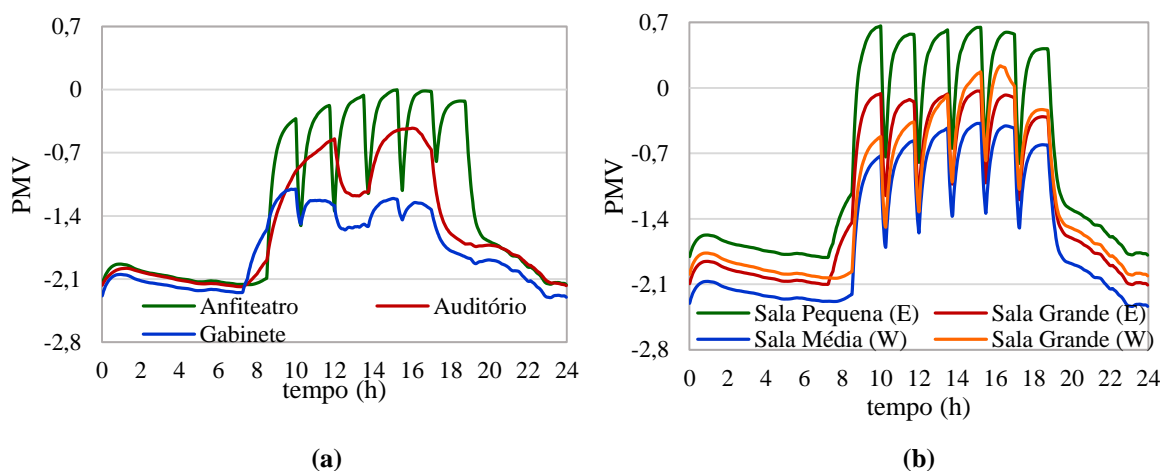


Figura 8.9: Simulação de inverno mostrando a evolução do índice PMV ao longo do dia no(a): (a) Anfiteatro, Grande Auditório e Gabinete de apoio técnico (b) Sala Pequena (E), Sala Grande (E), Sala Média (W) e Sala Grande (W) do Complexo Pedagógico da Universidade do Algarve, para a situações em que apenas há ventilação.

Através dos resultados do PMV, em condições de inverno, verifica-se que:

- Sem sistema de climatização acionado, todos os compartimentos do edifício, com exceção do gabinete, estão confortáveis;
- As salas pequenas orientadas a Este atingem valores positivos de PMV devido ao pequeno volume das mesmas e ao facto de terem uma grande área envidraçada exposta a radiação solar durante grande parte do dia, aquecendo naturalmente estes compartimentos;

- Nos restantes compartimentos verificam-se valores negativos de PMV. Quanto mais negativos forem os valores de PMV, mais frio têm os ocupantes.

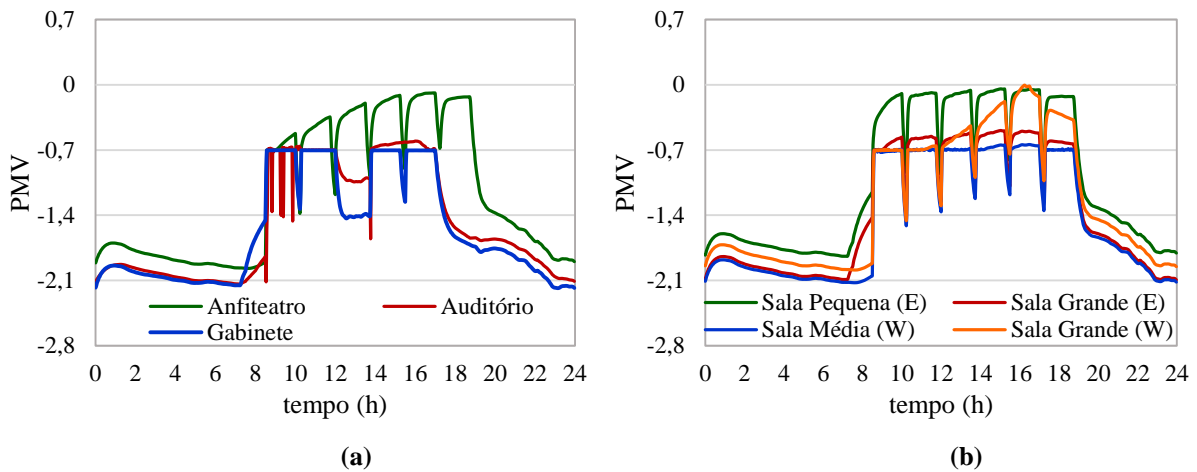


Figura 8.10: Simulação de inverno mostrando a evolução do índice PMV ao longo do dia no(a): (a) Anfiteatro, Grande Auditório e Gabinete de apoio técnico (b) Sala Pequena (E), Sala Grande (E), Sala Média (W) e Sala Grande (W) do Complexo Pedagógico da Universidade do Algarve, para a situações com sistema de climatização por compressão de vapor.

Com a observação dos gráficos da figura 8.10 é possível concluir que:

- O sistema de climatização por compressão de vapor confere uma melhoria nas condições de conforto dos compartimentos;
- O sistema de controlo é feito de acordo com a categoria C da norma ISO 7730 (2005), é aceitável que quando o compartimento fica desocupado e o sistema AVAC é desativado, os valores de PMV atinjam valores fora desta categoria.

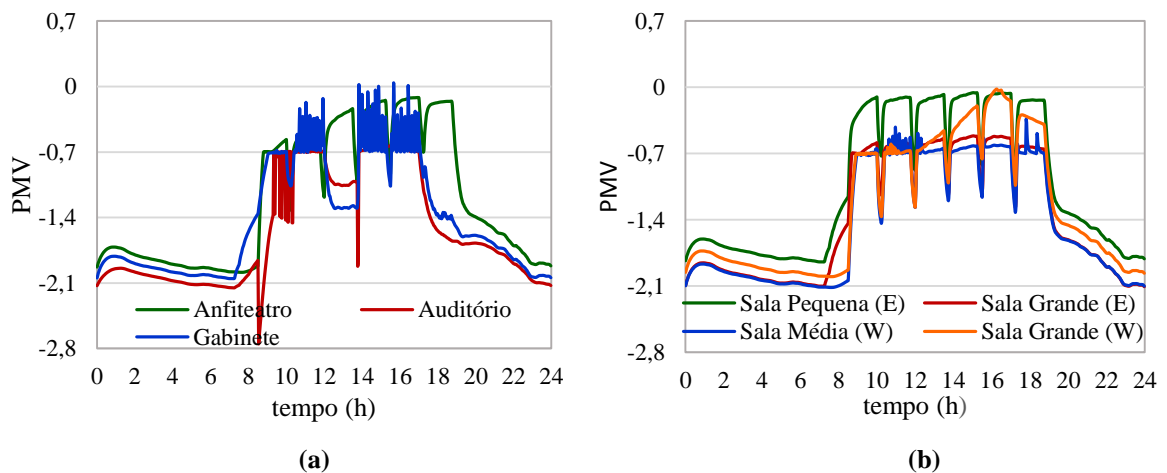


Figura 8.11: Simulação de inverno mostrando a evolução do índice PMV ao longo do dia no(a): (a) Anfiteatro, Grande Auditório e Gabinete de apoio técnico (b) Sala Pequena (E), Sala Grande (E), Sala Média (W) e Sala Grande (W) do Complexo Pedagógico da Universidade do Algarve, para a situações com sistema de climatização AVAC com coletores e termoconvetores.

Através da figura 8.11, é possível constatar que:

- À semelhança do sistema de climatização por compressão de vapor, o sistema AVAC com coletores e termoconvetores confere uma melhoria nas condições de conforto dos compartimentos face à situação em que a climatização está desativado;
- Às primeiras horas da manhã o sistema ainda não tem energia suficiente para fornecer condições de conforto a um espaço tão grande como o Auditório, mas sensivelmente a partir das 11h passa a ser feito o controlo;
- Novamente, quando os espaços passam a ser desocupados e o sistema de climatização é desligado o compartimento sofre um arrefecimento acentuado, que é facilmente corrigido pelo acionamento do sistema quando este torna a ser ocupado.

8.2.2. Verão

Na simulação de verão, devido aos valores elevados da temperatura do ar no ambiente exterior, o sistema de ar-condicionado é utilizado para fins de arrefecimento do ar no interior dos compartimentos. Em condições de verão é simulada a aplicação de coletores solares térmicos conectados a um sistema de ar-condicionado por ciclo de absorção responsável pelo arrefecimento dos compartimentos. O desempenho do sistema de ar-condicionado por ciclo de absorção é comparado com uma situação em que só há ventilação nos compartimentos (o sistema de climatização está desligado) e com o desempenho de um ar-condicionado com ciclo de compressão de vapor.

Radiação solar

Sendo que um dos sistemas estudados é o ar-condicionado por ciclo de absorção torna-se pertinente compreender a quantidade de radiação incidente nos coletores instalados no topo do edifício de estudo, uma vez que quanto mais radiação incidir sobre estes maior energia será convertida em calor fornecido ao fluido que irá iniciar o processo de climatização dos compartimentos.

A radiação também tem influência no aumento da temperatura no interior dos compartimentos uma vez que a parede Este do edifício possui uma grande área de envidraçados fazendo com que ocorram ganhos térmicos que exigirão um consumo

elevado de energia para que sejam atingidas condições de conforto. Na figura 8.12 apresentam-se os valores da radiação por m^2 de área de coletor.

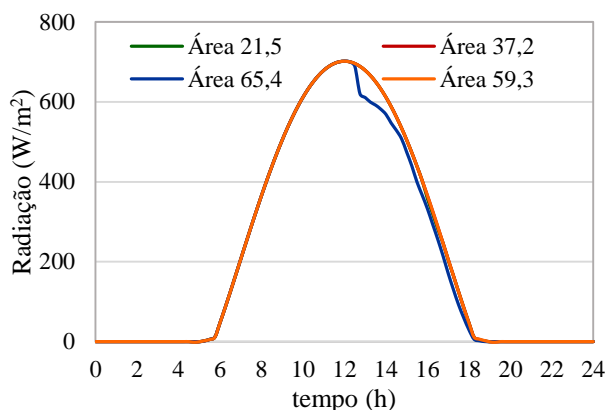


Figura 8.12: Radiação incidente nas diferentes áreas de fileiras de coletores solares na simulação de verão com regimes de ocupação e climatização totais.

Através da figura 8.12, é possível constatar que:

- Tal como na situação de inverno, verifica-se uma semelhança e uma sobreposição dos valores de radiação;
- Obtém-se um maior período diurno do que com a simulação de inverno;
- Existe um crescimento uniforme desde o momento em que o sol nasce até ao momento em que atinge o máximo de $700W/m^2$, valor superior ao obtido com a simulação de inverno. A partir daí verifica-se um decaimento da radiação até ao pôr-do-sol.

8.2.2.1. Ocupação e climatização totais

À semelhança da simulação de inverno, a primeira simulação de verão é feita com ocupação e climatização total dos compartimentos (regime máximo).

A taxa de ocupação está diretamente relacionada com os ganhos térmicos nos compartimentos. Um elevado número de ocupantes num compartimento introduz ganhos térmicos internos consideráveis que, conseqüentemente, se refletirão no consumo do sistema de climatização de forma a anular os ganhos térmicos.

Temperatura do fluido do depósito

Através da temperatura da água acumulada no depósito é possível ter uma perceção da quantidade de calor fornecida ao gerador, que irá iniciar o processo de climatização dos compartimentos, no caso da utilização do ar-condicionado por ciclo de absorção. O

gerador inicia o processo assim que lhe seja fornecida uma temperatura igual ou superior a 120°C. Na figura 8.13 apresenta-se a evolução da temperatura do fluido acumulado no depósito ao longo do dia.

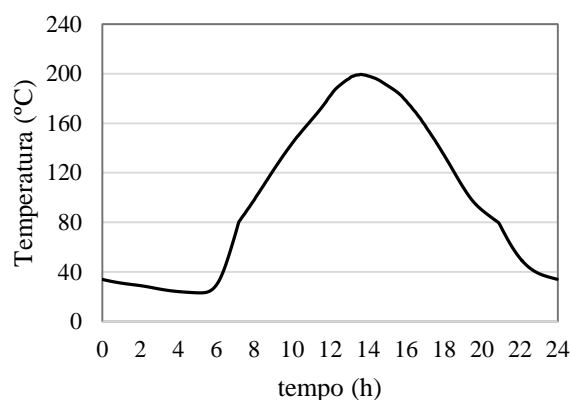


Figura 8.13: Simulação de verão mostrando a evolução ao longo do dia da temperatura do fluido armazenado no depósito do Complexo Pedagógico da Universidade do Algarve com regimes de ocupação e climatização totais.

De acordo com os resultados obtidos verifica-se que entre as 9 e as 19 horas a temperatura do fluxo no depósito atinge valores superiores a 120°C, ou seja esta temperatura suficiente para acionar o gerador e iniciar o processo de climatização dos compartimentos.

Horas de desconforto por calor

A comparação das horas de calor existentes quando é utilizada apenas ventilação com sistema de climatização ativa, permite compreender a melhoria que a utilização destes sistemas confere na obtenção de condições de conforto. Na tabela X apresentam-se as horas de calor sentidas pelos ocupantes nas três situações estudadas: apenas com ventilação, ar-condicionado por compressão de vapor e ar-condicionado por ciclo de absorção.

Tabela 8.4: Simulação de verão com regimes de ocupação e climatização totais representando as horas de desconforto por calor sentidas pelos ocupantes nas situações em que o sistema de climatização está desativado, com sistema ar-condicionado por compressão de vapor e por ciclo de absorção, de todos os compartimentos do edifício do Complexo Pedagógico.

Compartimento	Horas de Calor (h)		
	Ventilação	AC Compressão de vapor	AC Ciclo de absorção
Salas	1431,0	144,3	1431,9
Anfiteatros	227,5	15,6	209,1
Zonas de passagem	461,1	438,6	501,6
Grande Auditório	55,9	0,2	32,1
Serviços técnicos	165,7	31,6	161,8
TOTAL	2341,3	630,3	2336,5

Através da tabela 8.4 verifica-se que:

- Existem muitas mais horas de desconforto por calor do que por frio. Isto é consequência do clima ameno de inverno e bastante rigoroso de verão;
- A utilização do sistema de ar-condicionado por ciclo de absorção não se mostra eficiente no arrefecimento dos compartimentos, tendo os ocupantes tanto desconforto por calor como na situação em que não é utilizado nenhum sistema de climatização;
- As horas de calor obtidas com o sistema por compressão de vapor servem como referência para o nível de conforto que é possível atingir com um sistema ideal;
- O maior contributo com desconforto nesta simulação ocorreu nas zonas de passagem, onde não há sistema de climatização.

Dióxido de Carbono

Os valores de dióxido de carbono nos compartimentos para as situações em que é apenas utilizada ventilação, ar-condicionado por compressão de vapor e ar-condicionado por ciclo de absorção da simulação de verão são iguais aos da simulação de inverno uma vez que os fatores que influenciam estes dados, nomeadamente, o regime de ocupação e a taxa de renovação de ar nos compartimentos, se mantiveram inalterados.

Consumo de energia

Na tabela 8.5 são apresentados os resultados relativos ao consumo de energia efetuados pelos sistemas de ar-condicionado estudados. Como o sistema é utilizado para produção de frio (remoção de calor) os resultados são apresentados com um sinal negativo no consumo.

Tabela 8.5: Simulação de verão com regimes de ocupação e climatização totais representando os consumos do ar-condicionado por compressão de vapor e por ciclo de absorção, de todas as salas climatizadas do edifício do Complexo Pedagógico.

Compartimentos	Consumo (KW.h/dia)	
	Compressão de vapor	Ciclo de absorção
Salas	-1590,8	-419,3
Anfiteatros	-246,2	-55,3
Grande auditório	-23,6	-3,7
Serviços técnicos	-67,0	-57,1
TOTAL	-1927,6	-535,4

Por observação da tabela 8.5 é possível verificar que:

- Ao contrário da simulação de inverno, existe uma diferença expressiva entre os consumos do sistema por compressão de vapor e do ar-condicionado por ciclo de absorção;
- O sistema por compressão de vapor apresenta um consumo cerca de três vezes superior ao ar-condicionado por ciclo de absorção;
- As diferenças consideráveis entre os consumos são indicativas de que o sistema de ar-condicionado por ciclo de absorção não tem capacidade de produzir energia suficiente para satisfazer as necessidades de conforto nos compartimentos;
- O facto anteriormente mencionado é corroborado pelos resultados relativos às horas de desconforto por calor que tornaram possível antever que o sistema de ar-condicionado por ciclo de absorção poderia não ter energia suficiente para fornecer condições de conforto aos ocupantes;
- A incapacidade de fornecer condições de conforto pode estar relacionada com o facto de que, apesar de haver mais radiação disponível, o elevado diferencial de temperaturas entre o ar exterior e o ar interior, requer que o sistema consuma uma grande quantidade de energia para remover as cargas térmicas, situação que não se verificava na simulação de inverno uma vez que o diferencial de temperaturas era menor e a radiação contribuía para o aquecimento a custo zero dos compartimentos.

PMV

Face aos resultados anteriores, é expectável que os valores de PMV reflitam o desconforto sentido pelos ocupantes dos compartimentos climatizados com o sistema de ar-condicionado por ciclo de absorção. Nos gráficos 8.14a e 8.14b apresenta-se a situação onde é apenas aplicada a taxa de ventilação, para perceber a melhoria que ambos os sistemas de climatização conferem aos compartimentos. Nos gráficos 8.15a e 8.15b e nos gráficos 8.16a e 8.16b apresentam-se os valores do índice PMV em alguns dos compartimentos climatizados com o sistema por compressão de vapor e por ciclo de absorção, respetivamente.

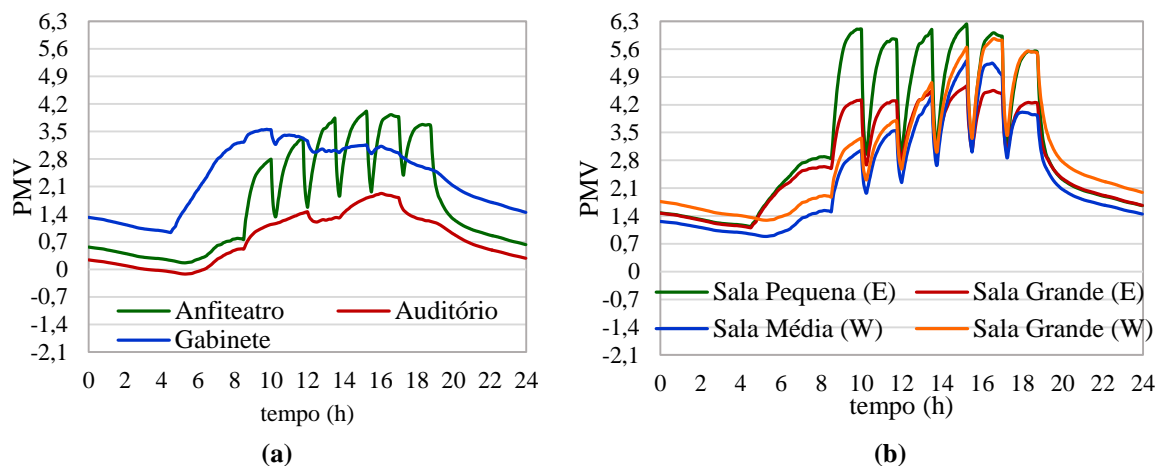


Figura 8.14: Simulação de verão com regimes de ocupação e climatização totais mostrando a evolução do índice PMV ao longo do dia no(a): (a) Anfitreatro, Grande Auditório e Gabinete de apoio técnico (b) Sala Pequena (E), Sala Grande (E), Sala Média (W) e Sala Grande (W) do Complexo Pedagógico da Universidade do Algarve, para a situações onde é apenas aplicada ventilação aos compartimentos.

Por observação da figura 8.14 é possível verificar que na situação em que é apenas aplicada ventilação (não há climatização dos compartimentos) os valores de são extremamente desconfortáveis por calor, atingindo valores muito superiores a +0,7 durante todo o período de ocupação dos compartimentos.

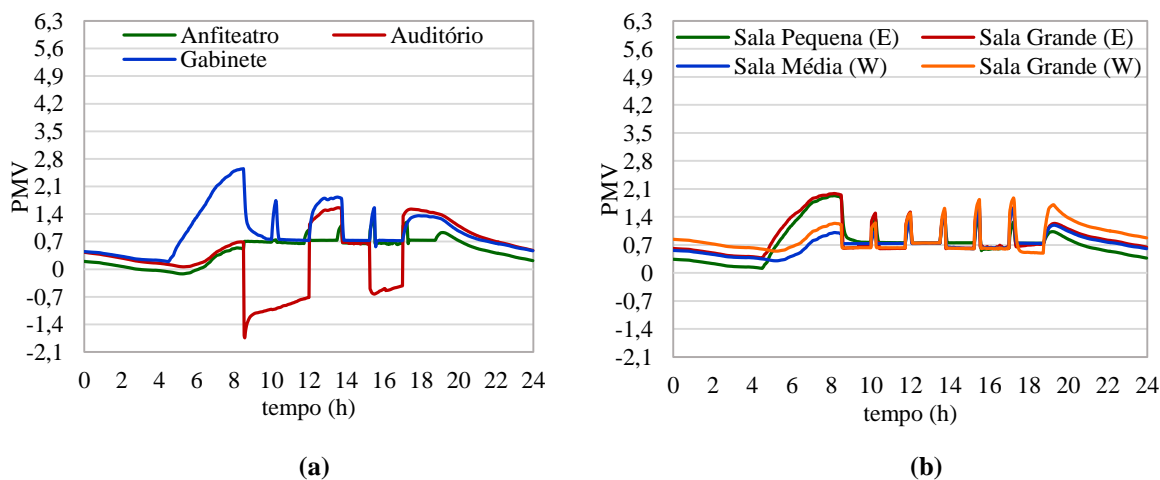


Figura 8.15: Simulação de verão com regimes de ocupação e climatização totais mostrando a evolução do índice PMV ao longo do dia no(a): (a) Anfitreatro, Grande Auditório e Gabinete de apoio técnico (b) Sala Pequena (E), Sala Grande (E), Sala Média (W) e Sala Grande (W) do Complexo Pedagógico da Universidade do Algarve, para a situações com sistema de climatização elétrica.

Relativamente ao sistema de ar-condicionado por compressão de vapor, através da figura 8.15 observa-se que o sistema de compressão de vapor mostra-se eficiente na climatização dos compartimentos mantendo os valores de PMV na ordem dos +0,7;

A exceção ocorre no grande auditório onde surgem valores negativos de PMV. Isto acontece porque o auditório é um compartimento com um volume bastante elevado, consequentemente necessita de uma alta injeção de caudal de ar, como o PMV engloba

vários parâmetros, valores grandes de velocidade do ar causam um desconforto por frio nos ocupantes que se reflete nos valores do PMV.

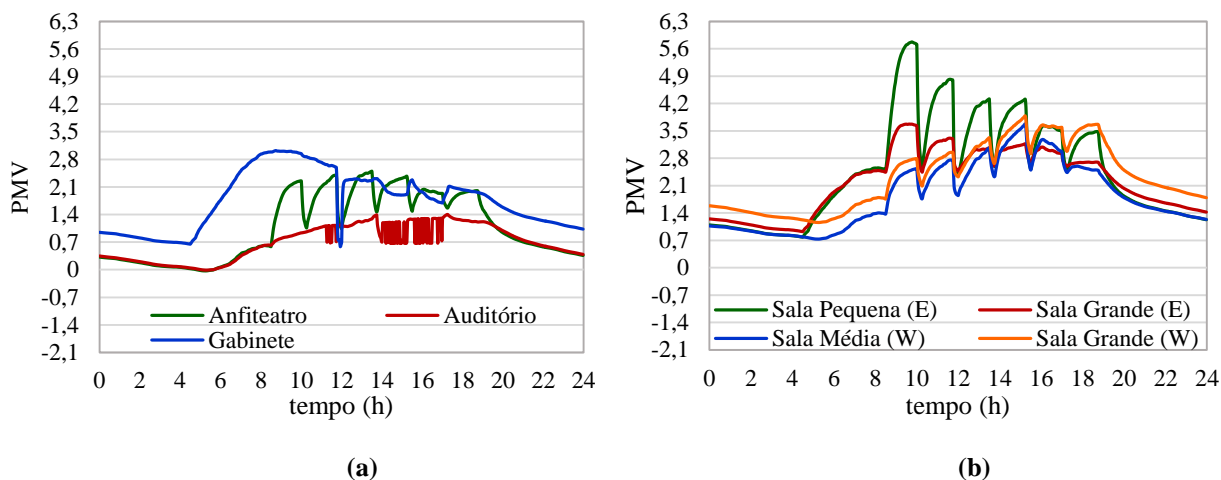


Figura 8.16: Simulação de verão com regimes de ocupação e climatização totais mostrando a evolução do índice PMV ao longo do dia no(a): (a) Anfitreato, Grande Auditório e Gabinete de apoio técnico (b) Sala Pequena (E), Sala Grande (E), Sala Média (W) e Sala Grande (W) do Complexo Pedagógico da Universidade do Algarve, para a situações com sistema de climatização por ciclo de absorção.

Os resultados do PMV relativos à simulação com ar-condicionado por ciclo de absorção permitem concluir que:

- Ocorre uma melhoria pouco significativa nas condições de conforto em relação à situação em que é apenas aplicada uma taxa de ventilação aos compartimentos;
- A aplicação do sistema de climatização com ciclo de absorção não melhora as condições de desconforto por calor sentida pelos ocupantes, demonstrando a ineficiência do sistema de ar-condicionado na simulação de verão, com o regime de ocupação e o número de ocupantes simulado.

8.2.2.2. Ocupação e climatização parcial

Uma vez que o sistema de ar-condicionado por ciclo de absorção na situação de verão com a taxa de ocupação completa não se mostrou eficiente na climatização dos compartimentos, por análise à quantidade de energia produzida pelo sistema de ar-condicionado por ciclo de absorção comparado com o sistema de ar-condicionado por compressão de vapor, verificou-se a necessidade de adaptar o caso de estudo a uma situação mais próxima da realidade. Para tal reduziu-se em cerca de 1/3 o número de ocupantes por compartimento e desocupou-se alguns compartimentos total ou parcialmente (só durante o período da manhã ou só durante o período da tarde). As salas orientadas a Oeste são ocupadas apenas durante o período da manhã e as salas orientadas a Este são ocupadas apenas durante o período da tarde. Assim procedeu-se a estas alterações e refez-se a

simulação na expectativa de aferir o desempenho do sistema de ar-condicionado por ciclo de absorção em condições onde há energia suficiente para climatizar as salas.

Temperatura do fluido do depósito

Como foi mencionado anteriormente, o gerador do sistema de ar-condicionado por ciclo de absorção necessita que lhe seja fornecida uma temperatura igual ou superior a 120°C para iniciar o processo de climatização. Na figura 8.17 apresenta-se a evolução da temperatura do fluido acumulado no depósito ao longo do dia.

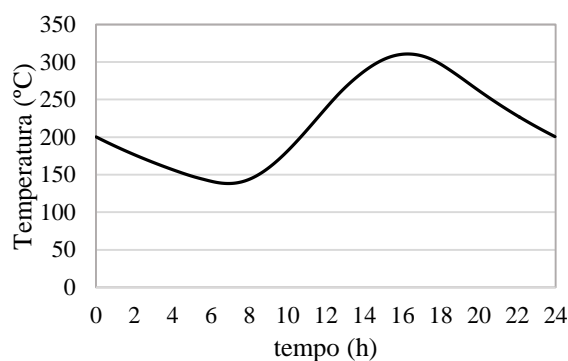


Figura 8.17: Simulação de verão mostrando a evolução ao longo do dia da temperatura do fluido armazenado no depósito do Complexo Pedagógico da Universidade do Algarve com ocupação e climatização parciais.

É possível verificar, através da figura 8.17, que a temperatura máxima atingida no depósito é de cerca de 200°C às 15h. Existe um desfasamento normal face ao pico da radiação, uma vez que os coletores necessitam de tempo para transferir a energia ao fluido.

Horas de desconforto por calor

Nesta nova simulação foi eliminada totalmente a ocupação das zonas de passagem porque considerou-se que o tempo que os ocupantes passam nas zonas de passagem é pouco relevante. Estas zonas, por não terem nenhum tipo de climatização ativa, contribuem grandemente para o desconforto dos seus ocupantes tanto no verão como no inverno. Esta alteração fará com que ocorra uma diminuição no número total de horas de desconforto.

Face ao novo regime de ocupação e à diminuição do número de espaços climatizados apresentam-se na tabela 8.6 os novos valores das horas de desconforto por calor obtidas na simulação de verão.

Tabela 8.6: Simulação de verão com regimes de ocupação e climatização parciais representando as horas de desconforto por calor sentidas pelos ocupantes nas situações em que é apenas aplicada uma taxa de ventilação, com sistema ar-condicionado por compressão de vapor e por ciclo de absorção, de todos os compartimentos do edifício do Complexo Pedagógico.

Compartimento	Horas de Calor (h)		
	Ventilação	AC Compressão de vapor	AC Ciclo de absorção
Salas	419,2	54,0	101,9
Anfiteatros	35,8	4,9	3,6
Grande Auditório	7,2	0,3	5,2
Serviços técnicos	165,3	31,7	60,6
TOTAL	627,6	91,0	171,3

Através dos resultados das horas de calor, dados pela tabela 8.6, é possível constatar que:

- Ao comparar os valores obtidos com o sistema de climatização por ciclo de absorção com a situação em que é apenas aplicada uma taxa de ventilação, verifica-se uma diminuição substancial das horas de desconforto por calor sentidas pelos ocupantes dos compartimentos.
- Ao comparar ambos os sistemas de climatização verifica-se que o sistema de ar-condicionado por ciclo de absorção não atinge resultados tão bons quanto o sistema de ar-condicionado por compressão de vapor que é considerado ideal, mas que apesar disso tem um bom desempenho.

Dióxido de Carbono

Como foi mencionado anteriormente a concentração de CO₂ varia consoante o número de ocupantes dos compartimentos, do seu respetivo metabolismo, do volume do compartimento e da taxa de ventilação a eles aplicada. Ao diminuir o número de ocupantes por compartimento e ao desocupar alguns compartimentos total ou parcialmente altera-se as concentrações de dióxido de carbono relativamente às simulações anteriores.

Nas figuras 8.18a e 8.18b são apresentados os valores de CO₂ nos compartimentos estudados, para a situação onde há apenas ventilação, com ar-condicionado por compressão de vapor e ciclo de absorção.

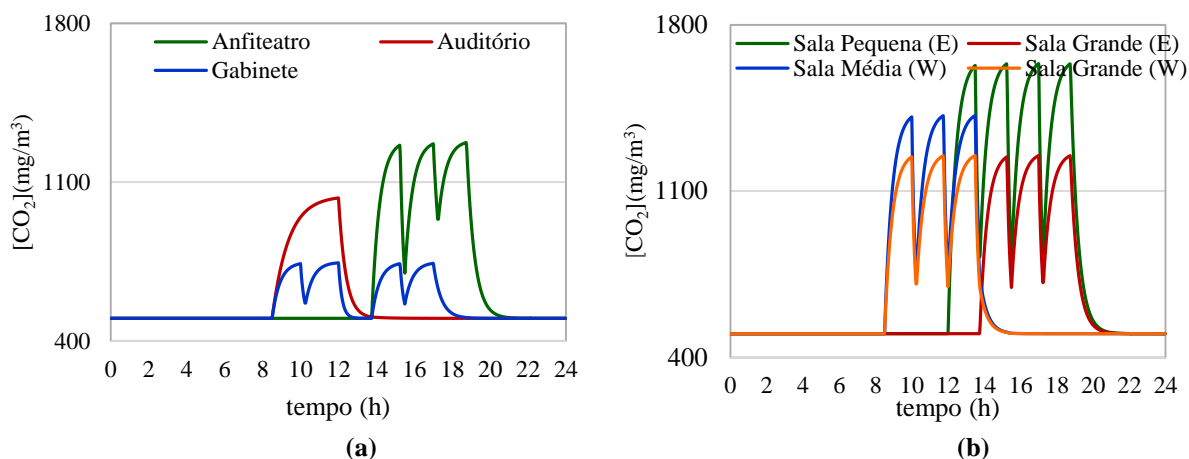


Figura 8.18: Evolução da concentração de dióxido de carbono (CO_2) ao longo do dia no(a): (a) Anfiteatro, Grande Auditório e Gabinete de apoio técnico (b) Sala Pequena (E), Sala Grande (E), Sala Média (W) e Sala Grande (W) do Complexo Pedagógico da Universidade do Algarve, para as situações com sistema de climatização desligada, ar-condicionado por compressão de vapor e ar-condicionado por ciclo de absorção, na simulação de verão com regimes de ocupação e climatização parciais.

Através da figura 8.18 é possível verificar que a alteração do número de ocupantes e dos regimes de ocupação e climatização se refletiu numa melhoria da qualidade do ar interior uma vez que os valores da concentração de dióxido de carbono não ultrapassam os limites da legislação, ou seja, não há nenhum compartimento a atingir valores superiores a 1800 mg/m^3 .

Consumo de energia

A redução de 1/3 dos ocupantes por compartimento, a desocupação de alguns compartimentos e a alteração do regime de ocupação foi feita com o objetivo de ter energia suficiente para climatizar os compartimentos e aproximar o consumo do sistema por ciclo de absorção ao sistema por compressão de vapor (ideal).

Na tabela 8.7 apresentam-se os valores do consumo de energia de ambos os sistemas de climatização.

Tabela 8.7: Simulação de verão com regimes de ocupação e climatização totais representando os consumos do ar-condicionado por compressão de vapor e por ciclo de absorção, de todas as salas climatizadas do edifício do Complexo Pedagógico.

Compartimentos	Consumo (KW.h/dia)	
	AC Compressão de vapor	AC Ciclo de absorção
Salas	-430,5	-438,8
Anfiteatros	-32,4	-34,3
Grande auditório	-10,7	0
Serviços técnicos	-68,1	-62,9
TOTAL	-541,7	-536,0

Como se pode verificar pela tabela 8.7:

- A diminuição do número de salas ocupadas e o tempo de ocupação das salas, que consequentemente diminui o tempo de utilização do sistema de ar-condicionado se reflete num menor consumo.
- Neste parâmetro, o sistema de ar-condicionado por ciclo de absorção tem um desempenho quase tão bom quanto o sistema por compressão de vapor. Isto significa que o sistema de ar-condicionado por ciclo de absorção tem energia para fornecer quanto esta é solicitada;
- A exceção ao bom desempenho do sistema de ar-condicionado por ciclo de absorção ocorre no Grande Auditório que tem um regime de ocupação exclusivo durante o período da manhã e nessa altura ainda não foi produzida energia suficiente para atender a uma solicitação tão elevada de energia quanto a que o Grande Auditório necessita.

PMV

Em função dos resultados anteriores, nesta simulação espera-se que as alterações efetuadas se reflitam numa melhoria nos valores de conforto térmico sentido pelos ocupantes. Nos gráficos 8.19a e 8.19b apresenta-se os valores do índice PMV em alguns dos compartimentos climatizado para a situação onde é apenas aplicada a taxa de ventilação. Nos gráficos 8.20a e 8.20b e nos gráficos 8.21a e 8.21b apresentam-se igualmente os resultados do PMV com o sistema por compressão de vapor e por ciclo de absorção, respetivamente.

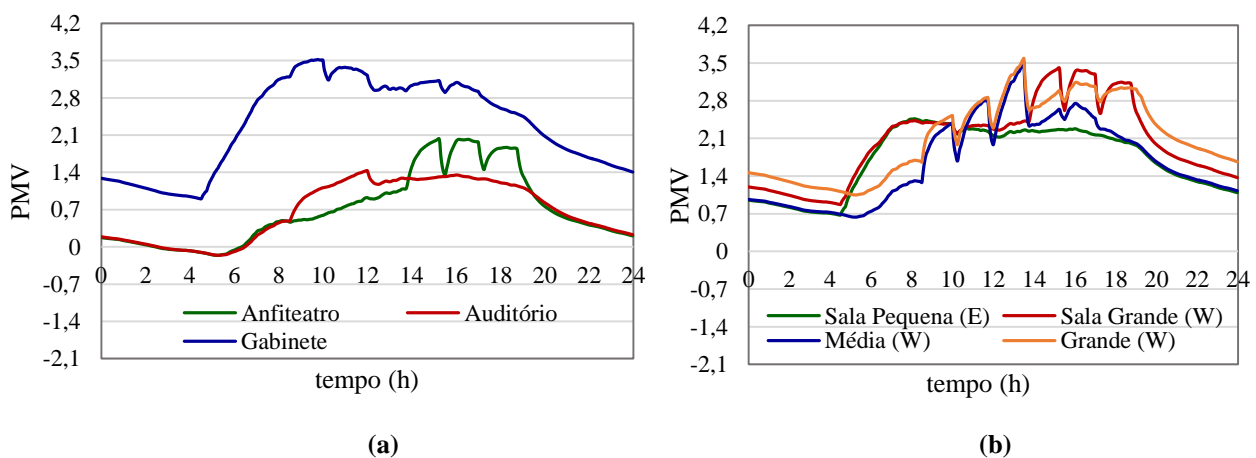


Figura 8.19: Simulação de verão com regimes de ocupação e climatização parciais mostrando a evolução do índice PMV ao longo do dia no(a) (a) Anfiteatro, Grande Auditório e Gabinete de apoio técnico (b) Sala Pequena (E), Sala Grande (E), Sala Média (W) e Sala Grande (W) do Complexo Pedagógico da Universidade do Algarve, para a situações em que é apenas aplicada uma taxa de ventilação.

Ao comparar os resultados da simulação de verão anterior com a atual, verifica-se que as modificações feitas se refletem numa melhoria da sensação de desconforto sentido pelos ocupantes quando estes têm que permanecer nos compartimentos.

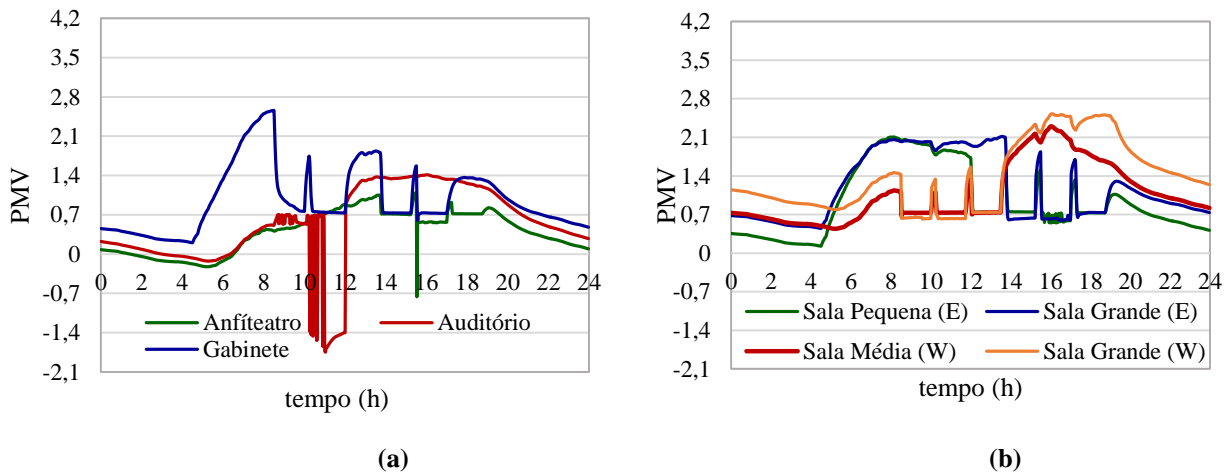


Figura 8.20: Simulação de verão com regimes de ocupação e climatização parciais mostrando a evolução do índice PMV ao longo do dia no(a): (a) Anfiteatro, Grande Auditório e Gabinete de apoio técnico (b) Sala Pequena (E), Sala Grande (E), Sala Média (W) e Sala Grande (W) do Complexo Pedagógico da Universidade do Algarve, para a situações com sistema de climatização por compressão de vapor.

Através dos resultados relativos ao ar-condicionado por compressão de vapor verifica-se que existe controlo em torno do PMV igual a +0,7 no entanto verifica-se uma exceção será seguidamente justificada. O Grande Auditório é apenas ocupado da parte da manhã e para serem atingidas condições de conforto no seu interior são injetadas caudais de ar no compartimento. Sendo que um dos parâmetros que influencia os valores de PMV é a velocidade do ar, verifica-se que é este o parâmetro que causa desconforto por frio aos ocupantes.

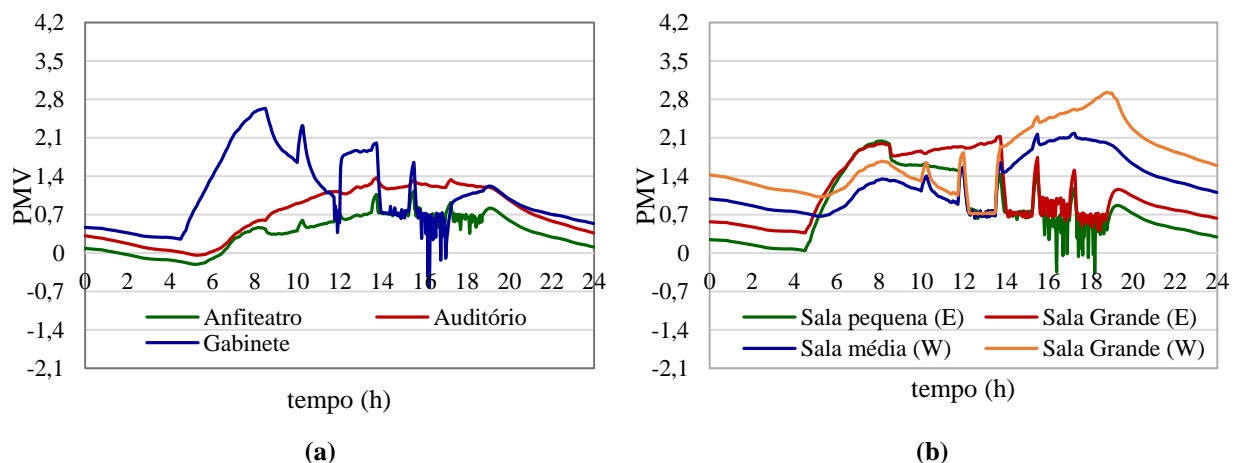


Figura 8.21: Simulação de verão com regimes de ocupação e climatização parciais mostrando a evolução do índice PMV ao longo do dia no(a): (a) Anfiteatro, Grande Auditório e Gabinete de apoio técnico (b) Sala Pequena (E), Sala Grande (E), Sala Média (W) e Sala Grande (W) do Complexo Pedagógico da Universidade do Algarve, para a situações com sistema de climatização por ciclo de absorção.

Na situação da simulação por ciclo de absorção verifica-se que:

- Apesar de as alterações introduzidas terem resultado numa melhoria geral das condições de conforto nas salas, a energia fornecida pelo sistema por ciclo de absorção ainda se mostra insuficiente para satisfazer as necessidades do grande auditório verificando-se desconforto por calor;
- Nos restantes compartimentos é possível observar que é feito o controlo em torno de $+0,7$ quando os ocupantes se encontram no interior dos compartimentos.

9. Aplicações futuras

O objetivo desta dissertação foi otimizar o consumo de energia do edifício pertencente à Universidade do Algarve. Através deste estudo compreendeu-se a energia produzida pelo sistema eólico não é suficiente para sustentar o sistema de iluminação durante o período de ocupação dos compartimentos, mas tem capacidade para os computadores e outros aparelhos elétricos. Sugere-se que seja utilizada a iluminação natural sempre que possível.

Relativamente à climatização com recurso ao sistema de ar-condicionado por ciclo de absorção acoplado com coletores solares ficou evidente que durante o inverno é possível garantir condições de conforto em todos os compartimentos mas durante o verão isso não é possível.

Assim no seguimento do estudo realizado nesta dissertação, sugere-se que futuramente para aumentar a produção de energia se dimensione um dispositivo eólico com uma curva de contração mais elevada de forma a aumentar as velocidades do escoamento direcionado para a turbina eólica e maximizar a produção de energia elétrica. Uma vez que estão instalados coletores solares no topo do edifício para climatização dos compartimentos não poderão ser aí instalados painéis fotovoltaicos para produção de energia, uma alternativa seria instalar células fotovoltaicas nas paredes exteriores do edifício com maior exposição solar.

Relativamente à climatização do edifício de estudo salienta-se a importância do regime de ocupação dos compartimentos na qualidade do ar e no conforto dos ocupantes, sendo que a sugestão feita vai no sentido de as turmas e os horários serem planeados tendo em conta estes fatores.

10. Conclusões

Nesta dissertação foi realizado um estudo sobre a utilização de um sistema de ar-condicionado por ciclo de absorção para climatização dos compartimentos do edifício do Complexo Pedagógico no campus de Gambelas da Universidade do Algarve e um estudo da utilização de um dispositivo de aceleração e o direcionamento do escoamento para uma turbina eólica, para produção de energia elétrica a ser consumida pelo sistema elétrico e de iluminação do mesmo edifício. A simulação solar foi conduzida com recurso ao *modelo Efficient Buildings*, para a simulação eólica recorreu-se ao programa *Computational Fluid Dynamics* (CFD).

A simulação eólica teve como objetivo simular numericamente a geração de energia elétrica a ser consumida pelo edifício através da utilização de uma turbina eólica potenciada pela utilização de um sistema de direcionamento e aceleração do escoamento. Os resultados mostram que o dispositivo se mostra eficiente na concentração, aceleração e direcionamento do escoamento. Verifica-se que a utilização do dispositivo acelera o escoamento a montante de 1m/s até uma velocidade máxima de 10,5 m/s atingida na parte central do dispositivo. Assim determinou-se a energia produzida pela utilização combinada do sistema de concentração de escoamento e um aerogerador donQi 175KW. Para o caso da velocidade máxima de 10,5 m/s, verificou-se ser possível produzir anualmente 7500 KW.h, ou seja, aproximadamente 20,5 KW.h por dia, energia essa que pode ser usada pelo edifício. A estimativa da energia consumida pelos compartimentos mostra que a energia produzida pelo aerogerador é inferior ao consumo pelo sistema de iluminação do edifício no entanto é suficiente para alimentar 8 computadores ligados durante 8 horas por dia.

O objetivo da simulação solar foi verificar se as condições de conforto térmico e qualidade do ar no interior dos compartimentos se mantinham com a utilização de um sistema que não o consome energia elétrica. Para tal foram feitas simulações de inverno e de verão.

Na simulação em condições de verão, foi estudada a climatização dos compartimentos com recurso a um sistema de ar-condicionado solar com ciclo de absorção $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$ conectado a um conjunto de coletores solares montados no topo do edifício que fornecerão o calor necessário para iniciar o processo.

Na simulação em condições de inverno foram usados coletores solares com objetivo de aquecer a água no seu interior, esta atravessará um sistema de condutas que distribuirá o calor no interior dos compartimentos do edifício.

O desempenho do sistema de ar-condicionado por ciclo de absorção foi comparado com dois cenários, um em que não havia climatização ativa nos compartimentos, outro em que a climatização era feita com recurso a um sistema tradicional por compressão de vapor ativado eletricamente.

Os resultados da simulação de inverno mostram que o sistema por ciclo absorção não tem um desempenho tão bom com o sistema de ar-condicionado por compressão de vapor, no entanto, consegue melhorias substanciais na redução das horas de desconforto por frio, e nos valores do PMV. A energia produzida pelo sistema de ar-condicionado por ciclo de absorção é semelhante à energia elétrica consumida pelo sistema de compressão de vapor. Isto permite concluir que, em condições de inverno, a energia produzida é suficiente para climatizar os compartimentos do edifício.

Ao contrário da simulação de inverno, que revelou um bom desempenho com o regime de ocupação e climatização máximos, os resultados da simulação de verão com este regime demonstraram incapacidade de reduzir as horas desconforto por calor sentidas pelos ocupantes e os valores do PMV também refletem desconforto por calor. Os resultados do consumo de energia nesta simulação mostram ainda que a energia elétrica consumida pelo sistema de compressão de vapor é três vezes superior à energia produzida pelo sistema de ar-condicionado por ciclo de absorção, evidenciando assim a sua ineficiência. Assim, efetuou-se uma nova simulação de verão, mais realística, com redução do número de horas de ocupação dos compartimentos e do número de ocupantes por compartimento em cerca de 1/3. Com estas alterações observaram-se melhorias significativas nas condições de conforto dos compartimentos. Verificou-se uma redução acentuada nas horas de desconforto por calor e uma melhoria substancial nos valores do PMV. A produção de energia por parte do ar-condicionado por ciclo de absorção é próxima do consumo de energia do sistema de compressão de vapor.

Assim é possível concluir que, em condições de inverno, o sistema de climatização solar consegue garantir condições de conforto em todos os espaços com o regime de climatização e ocupação máxima, obtendo um desempenho próximo do sistema tradicional por compressão de vapor ativado eletricamente. Por outro lado, em condições

de verão, o sistema de ar-condicionado solar por ciclo de absorção usando o par água-amoníaco associado a um sistema de coletores solares não consegue garantir condições aceitáveis de conforto térmico para o regime de climatização e ocupação máxima. As condições de conforto aceitáveis são atingidas após a redução do número de horas de ocupação dos compartimentos e do número de ocupantes por compartimento.

11.Referências Bibliográficas

2E, (2015), “Energy & Environment – Equipment for Engineering Education”, G.U.N.T., Hamburgo.

Amaay, (2014), “PUMBA 2 - *Projet pilote éolien, aménagement du square du Bastion*” Présentation à la commune d’Ixelles, Urban Sustainability.

APA – Agência Portuguesa do Ambiente, (2009), “*Qualidade do Ar em Espaços Interiores – Um Guia Técnico*”, Amadora

Althouse, A., Turnquist, C., Bracciano, A., (2004), “*Modern Refrigeration and Air Conditioning*”, 9ª Edição, *The Goodheart-Willcox Company Inc.*

Asfour, O., Gadi, M., (2007), “*A comparison between CFD and Network models for predicting wind-driven ventilation in buildings*”, *Building and Environment*, nº 42, páginas 4079-4085.

ASHRAE – AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS, (2002), “*Ammonia as a Refrigerant*”, Atlanta – Georgia.

Blocken, B. Carmeliet, J., (2004), “*Pedestrian Wind Environment around Buildings: Literature Review and Practical Examples*”, *Journal of Thermal Envelope and Building Science*, nº 28, páginas 107-159.

Blondeau, P., Iordache, V., Poupard, O., Genin D., Allard, F., (2005), “*Relationship between outdoor and indoor air quality in eight French schools*”, *Indoor Air*, nº 15 páginas 2-12.

Buratti, C., Ricciardi P., (2009), “*Adaptive analysis of thermal comfort in university classrooms: Correlation between experimental data and mathematical models*”, *Building and Environment*, nº 44, páginas 674 – 687.

Bvumbe, J., Inambao, F., (2011), “*Solar Powered Absorption Cooling System for Southern Africa*”. University of Kwazulu-Natal, Durban, África do Sul.

Centnerova, L., Hensen, J., (2001), “*Energy and indoor temperature consequences of adaptive thermal comfort standards*”. Slovak society for environmental Technology, Bratislava.

Chemisana, D., López-Villada, J., Coronas, A., Rosell, J., Lodi, C., (2013), “*Building integration of concentrating systems for solar cooling applications*”, *Applied Thermal Engineering*, volume 50, páginas 1472 – 1479.

Chen, Q., (2004), “*Using computational tools to factor wind into architectural environment design*”, *Energy and Buildings*, nº36, páginas 1197-1209.

Conceição, E., Lúcio, M^a. (2008), “*Thermal Study of School Buildings in Winter Conditions*”, *Building and Environment*, nº 43, páginas 782- 792.

Conceição, E., Lúcio, M^a. (2006), “Numerical study of thermal of school buildings in summer conditions”, *Healthy Buildings*, nº 3, páginas 195-200.

Conceição, E., (2003), “Numerical Simulation of Buildings Thermal Behaviour and Human Thermal Comfort Multi-node Models”, 8th International IBPSA Conference - Building Simulation. Eindhoven Holanda, 11 a 14 de Agosto, páginas 227-234.

Conceição, E., Nunes, C., Lúcio, M^a. (2015), “Energy and Comfort in School Buildings in the South of Portugal”, ICUC9 – 9th International Conference on Urban Climate jointly with 12th Symposium on the Urban Environment.

Conceição, E., Santiago, C., Lúcio, M^a. (2014), “Avaliação das condições de conforto térmico a que os ocupantes estão sujeitos em espaços equipados com sistemas de chão radiante aquecido”, Estratégias e Tecnologias de AVAC para a Sustentabilidade dos Edifícios, 14.as Jornadas de Engenharia de Climatização, Ordem dos Engenheiros.

Corgnati, S., Ansaldi, R., Filippi, M., (2009), “Thermal comfort in Italian classrooms under free running conditions during mid seasons: assessment through objective and subjective approaches”, *Building and Environment*, nº44, páginas 785-792.

Daisey, J., Angell, W., Apte, M., (2003), “Indoor air quality, ventilation and health symptoms in schools: an analysis of existing information”, *Indoor Air*, nº13, páginas 53–64.

Dall’O’, G., Sarto, L., (2013), “Potential and limits to improve energy efficiency in space heating in existing school buildings in northern Italy”, *Energy and Buildings*, nº 67, páginas 298–308.

Decreto-Lei nº 79/06, (2006), “Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios (RSECE)”, *Diário da República*, 4 de Abril.

DGEG – Direção-Geral de Energia e Geologia, (2015), “Energia em Portugal”, Ministério do Ambiente, Ordenamento do Território e Energia, ano de referência 2013.

Dossat, R., Horan, T., (2002), “Principles of Refrigeration”, 5^a edição, Pearson.

Economidou, M., Janssen, R., Constantinescu, T., “Transforming Europe’s buildings: A country-by-country review on the energy performance of buildings”, Energy efficiency first: The foundation of a low-carbon society, páginas 1255-1266.

EIA – Energy Information Administration, (2001), “Residential Energy Consumption Survey (RECS)”, U.S. Department of Energy.

European Commission, (2014), “EU Energy and Transport in Figures”, Statistical Pocket Book, Bélgica.

Eurostat – Comissão Europeia, (2015), “Energy dependance”, dados relativos ao período 1990-2013, disponível em: <http://ec.europa.eu/eurostat/tgm/table.do?tab=table&plugin=1&language=en&pcode=tsdcc310> Data da consulta: 21/12/2015

Fanger, P., (1970), “Thermal comfort. Analysis and applications in environmental engineering”, McGraw-Hill.

- Farhan, L., Ibrahim, K., Ahmed, H., Zainab O., Zainab, Z., (2012), “*Liquid paraffin wax solar absorption refrigerator system*”, *Elixir Electrical Engineering*, nº48, páginas 9607-9611.
- Fraga, S., Ramos, E., Martins, A., Samudio, M. J., Silva, G., Guedes, J., Barros, H., (2008), “*Indoor air quality and respiratory symptoms in Porto schools*”. *Revista Portuguesa de Pneumologia*, volume XIV, nº4, páginas 487-507.
- Frontczak M., Wargocki P., (2011), “*Literature survey on how different factors influence human comfort in indoor environments*”, *Building Environment*, nº 46, páginas 922-937.
- Godwin, C., Batterman, S., (2007), “*Indoor air quality in Michigan schools*”, *Indoor Air*, nº 17, páginas 109-121.
- Gonçalves, H., Graça, J., (2004), “*Conceitos Bioclimáticos para os Edifícios em Portugal*”, Ficha técnica, LNEG - Laboratório Nacional de Energia e Geologia.
- Graudenz, G., Oliveira, C., Tribess, A., Mendes, C., Jr, Latorre, M. , Kalil, J., (2005), “*Association of air-conditioning with respiratory symptoms in office workers in tropical climate*”, *Indoor Air*, nº 15, páginas 62–66.
- GREENPRO, (2004), “*Energia Solar Térmica – Manual sobre tecnologias, projeto e instalação*”, Projeto ALTENER.
- Gul, M., Patidar, S., (2015), “*Understanding the energy consumption and occupancy of a multi-purpose academic building*”, *Energy and Buildings*, nº 87, páginas 155–165
- Henning, H., Döll, J., (2012), “*Solar systems for heating and cooling of buildings*”, *Energy Procedia*, nº 30, páginas 633 – 653.
- Henning, H., (2011), “*Solar Cooling Position Paper*”, IEA SHC Task 38 Solar Air-conditioning and Refrigeration.
- Heschong, L., (2003), “*Windows and Classrooms: A Study of Student Performance and the Indoor Environment*”, Technical Report, California Energy Commission.
- IEA – International Energy Agency, (2010), “*State of the art – Survey on new solar cooling developments*”, SHC – Solar Heating and
- INE – Instituto Nacional de Estatística, (2015a), “*Estabelecimentos de ensino superior (N.º) por Localização geográfica (NUTS - 2002) e Natureza institucional; Anual*”, Ministério da Ciência, Tecnologia e Ensino Superior, ano de referência 2014.
- INE – Instituto Nacional de Estatística, (2015b), “*Estabelecimentos de ensino não superior (N.º) por Localização geográfica (NUTS - 2002), Nível de ensino ministrado e Natureza institucional; Anual*”, Ministério da Educação, ano de referência 2014.
- Inverno, A., Lamarão, A., (2003) “*Caracterização Energética do País e do Algarve – Uma Breve Abordagem*”, EST/UAlg, Portugal.
- Iqbal, M., (1983), “*An Introduction to Solar Radiation*”, Academic Press, Canadá.

ISO 7730 (2005), “*Ergonomics of thermal environmental – Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria*”, European Committee of standardization.

Ito, K., Murakami, S., Kaneko, T., Fukao H. (2006), “*Study on the Productivity in Classroom (parte2) – Realistic Simulation Experiment on Effects of Air Quality/Thermal Environment on Learning Performance*”, *Proceedings of Healthy Buildings*.

Jha, A., (2010), “*Wind Turbine Technology*”, CRC Press

Jones, P., Alexander, D., Burnett, J., (2004), “*Pedestrian Wind Environment Around High-Rise Residential Buildings in Hong Kong*”, *Indoor and Built Environment*, n° 13, páginas 259-269.

Kalogirou, S., (2004), “*Solar thermal collectors and applications*”, *Progress in Energy and Combustion Science*, n° 30, páginas 231–295.

Kameda, K., Murakami, S., Ito, K., Kaneko, T., (2007), “*Study on productivity in the classroom (parte 3) – nationwide questionnaire survey on the effects of IEQ on learning*”, *Proceedings of Clima 2007 WellBeing Indoors*.

Kharagpur, (2008), “*Refrigeration & air conditioning*”, EE IIT, Índia.

Khedari, J., Yamtraipat, N., Pratintong, N., Hirunlabh, J., (2000), “*Thailand ventilation comfort chart*”, *Energy and Buildings*, n° 32, páginas 245–249.

Kim, D. & Ferreira, C., (2008), “*Solar refrigeration options – a state-of-the-art review*”, *International Journal of Refrigeration*, n° 31, páginas 3 – 15.

Klepeis, N., Nelson, W., Ott, W., Robinson, J., Tsang, A., Switzer, P., Behar, J., Hern, S., Engelmann, W., (2001), “*The National Human Activity Pattern Survey (NHAPS): A resource for assessing exposure to environmental pollutants*”, *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology*, n° 11, páginas 231-252.

Kosonen, R., Tan, F., (2004), “*The effect of perceived indoor air quality on productivity loss*”, *Energy and Buildings*, n° 36, páginas 981-986.

Lackney, J., (2001), “*The State of Post-Occupancy Evaluation in the Practice of Educational Design*”, relatório realizado para a EDRA – Environmental Design Research Association, 32, Edimburgo, Escócia.

Ledo, L., Kosasih, P., Cooper, P., (2011), “*Roof mounting site analysis for micro-wind turbines. Renewable Energy*”; n°36, páginas1379-1391.

Lee, M., Mui, K., Wong L., Chan W., Lee E., Cheung C. (2012), “*Student learning performance and indoor environmental quality (IEQ) in air-conditioned university teaching rooms*”, *Building and Environment*, páginas 238-244.

Mendell, M., Heath, G., (2005), “*Do indoor pollutants and thermal conditions in schools influence student performance? A critical review of the literature*”, *Indoor Air*, n°15, páginas 27-52.

- Mertens, S., (2006), “*Wind energy in the built environment: concentrator effects of buildings*”, Essex: Multi-Science.
- Nguyen, T., Aiello, M., (2013), “*Energy intelligent buildings based on user activity: A survey*”, *Energy and Buildings*, nº 56, páginas 244–257.
- Nick-Leptin, J., (2005), “*Political framework for research and development in the field of renewable energies*”, Proceedings of International Conference Solar Air-conditioning, Bad Staffelstein, Alemanha.
- Otanicar, T., Taylor, R., Phelan, P., (2012), “*Prospects for solar cooling - an economic and environmental assessment*”, *Solar Energy* 86, 1287 – 1299.
- Paterson, D., & Apelt, C., (1989), “*Simulation of wind flow around three-dimensional buildings*”, *Building and Environment*, nº 24, páginas 39-50.
- Pereira, L., Cardoso, E., Silva, M., (2015), “*Indoor air quality audit and evaluation on thermal comfort in a school in Portugal*”, *Indoor and Built Environment*, nº 2, páginas 4256–268.
- Pereira, L., Raimondo, D., Corgnati, S., Silva M., (2014), “*Assessment of indoor air quality and thermal comfort in Portuguese secondary classrooms: Methodology and results*”, *Building and Environment*, nº 81, páginas 69-80.
- Pereira, M., (1985), “*Design and performance of a novel non-evacuated 1.2x CPC type concentrator*”, Proceedings of Intersol Biennial Congress of ISES, Montreal, Canada, vol. 2, páginas 1199-1204.
- Pérez-Lombard, L., Ortiz, J., Maestre, I., (2011), “*The map of energy flow in HVAC systems*”, *Applied Energy*, nº 88, páginas 5020-5031.
- Pérez-Lombard, L., Ortiz, J., Pout. C. (2008), “*A review on buildings energy consumption information*”, *Energy and Buildings*, nº 40, páginas 394–398.
- Qu, M., Yin, H., Archer D., (2010) “*A solar thermal cooling and heating system for a building: experimental and model based performance analysis and design*”, *Solar Energy*, nº 84, páginas 166–182
- Rathore M., (2010), “*Thermal Engineering*”, 1ª Edição, McGraw-Hill.
- Reiter, S., (2010), “*Assessing wind comfort in urban planning*”, *Environment and Planning B: Planning and Design*, nº37, páginas 857-873.
- Roriz, L., (2007), “*Climatização - Concepção, Instalação e Condução de Sistemas*”, 2ª edição, ORION.
- Ruano, A., Crispim, E., Conceição, E., Lúcio, M., (2006), “*Prediction of building's temperature using neural networks models*”, *Energy and Buildings*, nº 38, páginas 682-694.
- Said S., Spindler K., El-Shaarawi M., Siddiqui M., Schmid F., Bierling B., Khan M. (2016), “*Design, construction and operation of a solar powered ammonia–water*

absorption refrigeration system in Saudi Arabia”, *International Journal of Refrigeration*, nº 62, páginas 222 – 231.

Sekki, T., Airaksinenb, M., Saari, A., (2015a), “*Measured energy consumption of educational buildings in a Finnish city*”, *Energy and Buildings*, nº 87, páginas 105–115.

Sekki, T., Airaksinenb, M., Saari, A., (2015b), “*Impact of building usage and occupancy on energy consumption in Finnish daycare and school buildings*”, *Energy and Buildings*, nº 105, páginas 247–257.

Stankovic, S., Campbell, N., Harries, A., (2009), “*Urban Wind Energy*”, Earthscan.

Shaughnessy, R., Haverinen-Shaughnessy, U., Nevalainen, A., Moschandreas, D. (2006), “*A preliminary study on the association between ventilation rates in classrooms and student performance*”, *Indoor Air*, nº 16, 465–468.

Smith, P., (2005), “*Architecture in a Climate of Change - A guide to sustainable design*”, 2ª edição, Architectural Press.

Stoecker, W., (1958), “*Refrigeration and Air Conditioning*”, McGraw-Hill.

Thewes, A., Maas S., Scholzena F., Waldmanna D., Zürbes A. (2014) “*Field study on the energy consumption of school buildings in Luxembourg*”, *Energy and Buildings*, nº 68, páginas 460–470.

Thévenot, R., (1979), “*A History of Refrigeration Throughout the World*”, International Institute of Refrigeration (IIR).

Wang, S., (2000), “*Handbook of air conditioning and refrigeration*”, 2ª Edição, McGraw-Hill.

Wargocki, P., Wyon, D., Matysiak, B., Irgens, S., (2005), “*The effects of classroom air temperature and outdoor air supply rate on the performance of school work by children*”, *Indoor Air*, nº 1, páginas 368–372.

Weber, C., Berger, M., Mehling, F., Heinrich, A., Núñez, T., (2014), “*Solar cooling with water-ammonia absorption chillers and concentrating solar collector – Operational experience*”, *International Journal of Refrigeration*, nº 39, páginas 57 – 76.

WINEUR – Wind Energy Integration in the Urban Environment, (2007), “*Urban Wind Turbines – Guidelines for small wind turbines in the built environment*”, Intelligent Energy Europe.

Wong, N., Khoo, S., (2003), “*Thermal comfort in classrooms in the tropics*”, *Energy and Buildings*, nº 35, páginas 337–351