

Tiago Alexandre Albuquerque Carvalho

Sustentabilidade Energética em Espaços Universitários



UNIVERSIDADE DO ALGARVE

Faculdade de Ciências e Tecnologias

2016

Tiago Alexandre Albuquerque Carvalho

Sustentabilidade Energética em Espaços Universitários

Mestrado em Engenharia do Ambiente

Trabalho efetuado sob a orientação de: Prof. Dr. Eusébio Conceição



UNIVERSIDADE DO ALGARVE

Faculdade de Ciências e Tecnologias

2016

Declaro ser o autor deste trabalho, que é original e inédito.

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

Tiago Alexandre Albuquerque Carvalho

©**Copyright** Tiago Alexandre Albuquerque Carvalho

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:

Agradeço a todos os envolvidos na concretização desta etapa. Ao meu orientador Prof. Dr. Eusébio Conceição, por todo o apoio e dedicação demonstrados durante o desenvolvimento desta dissertação. Á minha família que sempre me motivou e apoiou durante este processo, aos amigos pelo companheirismo e á minha namorada pela paciência demonstrada.

Resumo

Neste estudo pretende-se encontrar soluções para atingir a sustentabilidade energética em edifícios escolares. O *software* utilizado simula as condições no interior e exterior do edifício para o estudo do conforto térmico, qualidade do ar e consumo energético.

Através do software elaboraram-se sistemas de ventilação capazes de aproveitar a energia térmica no interior do edifício. No verão, utilizou-se um sistema de ventilação que transporta o ar mais frio, de um compartimento subterrâneo criado para o efeito, para os compartimentos com maiores temperaturas. No Inverno, utilizam-se os compartimentos mais quentes como estufas internas, de onde é ventilado o ar para os compartimentos com menores temperaturas. Como os sistemas de ventilação não são suficientes para a obtenção de um conforto térmico desejável, implementaram-se coletores solares com tubos a vácuo, que serviram de fonte de energia térmica para os sistemas de climatização. Tanto no verão como no Inverno utilizam-se termoconvectores ligados aos coletores para a climatização do edifício. No Inverno o calor proveniente dos coletores é utilizado diretamente na climatização, relativamente ao verão a refrigeração dá-se através do ciclo de absorção. Para sustentar os gastos energéticos associados à iluminação e uso de computadores do edifício, implementaram-se células fotovoltaicas nas paredes do edifício.

Através da realização do estudo percebeu-se que no Inverno é possível atingir a sustentabilidade energética e garantir o conforto térmico, relativamente ao verão o mesmo não acontece, as altas temperaturas registadas tornam a sustentabilidade energética difícil de alcançar.

Palavras-chave: Conforto Térmico; Ventilação; Qualidade do Ar Interior; Sustentabilidade energética.

Abstract

This study aims to find solutions to achieve energy sustainability in school buildings. The software used simulates conditions inside and outside the building for the study of thermal comfort, air quality and energy consumption.

Through the software is elaborated ventilation systems capable of harnessing the thermal energy inside the building. In the summer, we used a ventilation system that transfer the cooler air from na underground enclosure designed for the purpose, to rooms with higher temperatures. In winter, the use of hottest internal compartments as greenhouses, where the air to rooms with lower temperatures is vented. As the ventilation is not sufficient to obtain a desired thermal comfort, was implemented solar collectors with vacuum tubes, which served as a thermal energy source for air conditioning systems. In both, summer and winter are used convectors connected to collectors for air conditioning of the building. In the winter the heat coming from the collector is directly used in air conditioning, for summer cooling takes place through the absorption cycle. To sustain the energy costs associated with lighting and use of building computers, was implemented photovoltaic cells on the walls of the building.

Through the study it was observed that in winter it is possible to achieve energy sustainability and ensure thermal comfort for summer is not the case, the high temperatures recorded make difficult the achievement of energy sustainability.

Keywords: Thermal Comfort; Ventilation; Indoor Air Quality; energy sustainability.

Conteúdo

1	Introdução.....	1
1.1	Necessidade do estudo.....	1
1.2	Objetivos	2
2	Enquadramento Teórico	3
2.1	Conforto Térmico	3
2.1.1	Parâmetros ambientais influentes no conforto térmico	3
2.1.2	Variáveis Individuais influentes no conforto térmico	4
2.1.3	Métodos de estudo de conforto térmico	6
2.2	Qualidade do ar interior.....	12
2.3	Ventilação.....	14
2.3.1	Ventilação para a qualidade do ar interior.....	15
2.3.2	Ventilação para conforto térmico	16
2.4	Energia Solar	16
2.4.1	Coletor solar	18
2.4.2	Células fotovoltaicas.....	19
2.5	Processos de arrefecimento	20
3	Apresentação do Caso de Estudo	23
4	Metodologia.....	29
4.1	1ª Fase – Estrutura do edifício:.....	30
4.2	2ª Fase – Caracterização interior do edifício	33
4.2.1	Ocupação	33
4.2.2	AVAC.....	34
4.2.3	Ventilação.....	34
4.3	3º Fase – Implementação das ventilações.....	36
4.3.1	Verão (ventilação Subterrânea)	36
4.3.2	Inverno (ventilação estufas internas).....	37
4.3.3	Verificação do melhor sistema de ventilação	40

4.4	4ª Fase – Implementação dos sistemas AVAC.....	42
4.5	5ª Fase – Análise de consumos energéticos.....	43
5	Apresentação e discussão de resultados	44
5.1	1ª Fase – Condições exteriores	44
5.2	Condições Interiores.....	47
5.3	Comparação Ventilações	51
5.4	Comparação Sistemas AVAC	59
5.5	Análise de consumos energéticos.....	72
6	Dimensionamento.....	75
7	Considerações Finais.....	78

Índice de figuras

Figura 2.1 - Relação PPD vs PMV	9
Figura 2.2 - Relação entre a ventilação e os níveis de Dióxido de Carbono	13
Figura 2.3 - Radiação global em Portugal.....	18
Figura 2.4 - Coletor solar com tubos a vácuo.....	19
Figura 2.5 - Tecnologias de células fotovoltaicas	20
Figura 2.6 - Sistemas de arrefecimento elétricos e solares (térmicos).	21
Figura 2.7 - Funcionamento do ciclo de absorção.....	22
Figura 2.8 - Funcionamento do ciclo de compressão a vapor.	22
Figura 3.9 - Orientação do edifício	23
Figura 3.10 - Vista exterior dos edifícios FCT e Medicina; a) vista compacta b)vista raio x	24
Figura 3.11 - Piso 1 FCT	25
Figura 3.12 - Piso 2 FCT	25
Figura 3.13 - Piso 3 FCT	26
Figura 3.14 - Pisos 1 e 2 Medicina.....	26
Figura 3.15 - Piso 3 e 4 Medicina	27
Figura 4.16 - Esquema exemplar da implementação dos coletores.....	31
Figura 4.17 - Edifício com coletores e células	32
Figura 4.18 - Ventilação subterrânea efetuada de manhã.....	37
Figura 4.19 - Ventilação Subterrânea efetuada de tarde.....	37
Figura 4.20 - Ventilação Estufas Internas efetuada de manhã	38
Figura 4.21 - Ventilação Estufas Internas efetuada de tarde	38
Figura 4.22 - Ventilação estufas internas efetuada durante todo o dia.....	39
Figura 4.23 - Esquema dos sistemas e mecanismos de ventilação estudados	42
Figura 5.24 - Temperaturas exteriores (Verão e Inverno).....	44
Figura 5.25 - Radiação e energia térmica por m ² de coletor solar para o Verão e Inverno.	45
Figura 5.26 - Radiação incidente nas células fotovoltaicas e temperatura exterior (Verão)	46
Figura 5.27 - Radiação incidente nas células fotovoltaicas e temperatura exterior (Inverno).....	46
Figura 5.28 - Produção de energia nas células para as situações de Verão e de Inverno	46
Figura 5.29 - Temperatura dos compartimentos com a ventilação exterior 1 (VE1).	47
Figura 5.30 - Temperatura dos compartimentos com a ventilação subterrânea 1 (VS1).....	48
Figura 5.31 - Temperatura dos compartimentos com a Ventilação subterrânea 2 (VS2).....	48
Figura 5.32 - Temperatura dos compartimentos com a VE1 (Inverno).....	49

Figura 5.33 - Temperatura dos compartimentos com a VG1 (Inverno)	50
Figura 5.34 - Temperatura dos compartimentos com a VG2 (Inverno)	50
Figura 5.35 - Temperatura média do edifício para a VS1,VS2,VE1,VE2 utilizando um mecanismo de Jatos descendentes (JD).....	51
Figura 5.36 - Temperatura média do edifício para a VS1,VS2,VE1,VE2 utilizando um mecanismo de Ventilação por Impulsão (VI).....	51
Figura 5.37 - Nível máximo de CO ₂ no edifício para a VS1,VS2,VE1,VE2 utilizando um mecanismo de jatos descendentes (JD)	52
Figura 5.38 - Nível máximo de CO ₂ no edifício para a VS1,VS2,VE1,VE2 utilizando um mecanismo de Ventilação por Impulsão (VI).....	52
Figura 5.39 - Velocidade do ar máxima no edifício para a VS1,VS2,VE1,VE2 utilizando o mecanismo de jatos descendentes (JD)	53
Figura 5.40 - Velocidade do ar máxima no edifício para a VS1,VS2,VE1,VE2 utilizando o mecanismo de jatos descendentes (JD)	53
Figura 5.41 - Temperatura média do edifício com as diferentes ventilações para o mecanismo de jatos descendentes (Inverno).....	55
Figura 5.42 - Temperatura média do edifício com as diferentes ventilações para o mecanismo de ventilação por impulsão (Inverno)	55
Figura 5.43 - Nível máximo de CO ₂ no edifício para a VG1,VG2,VE1,VE2 utilizando um mecanismo de jatos descendentes (JD) (Inverno)	56
Figura 5.44 - Nível máximo de CO ₂ no edifício para a VG1,VG2,VE1,VE2 utilizando um mecanismo de ventilação por impulsão (JD) (Inverno).....	56
Figura 5.45 - Velocidade do ar máxima no edifício para a VG1,VG2,VE1,VE2 utilizando o mecanismo de jatos descendentes (JD) (Inverno)	56
Figura 5.46 - Velocidade do ar máxima no edifício para a VG1,VG2,VE1,VE2 utilizando o mecanismo de ventilação por impulsão (VI) (inverno).....	56
Figura 5.47 - Percentagem de ocupação em cada compartimento	59
Figura 5.48 - Comparação do PMV para os sistemas AVAC, Verão, Gabinete, Este.	60
Figura 5.49 - Comparação do PMV para os sistemas AVAC, Verão, Gabinete, Oeste	60
Figura 5.50 - Comparação do PMV para os sistemas AVAC, Verão, Gabinete, Sul.....	61
Figura 5.51 - Comparação do PMV para os sistemas AVAC, Verão, Gabinete, Norte.....	61
Figura 5.52 - Comparação do PMV para os sistemas AVAC, Verão, Laboratório, Este.....	61
Figura 5.53 - Comparação do PMV para os sistemas AVAC, Verão, Laboratório, Oeste.....	61
Figura 5.54 - Comparação do PMV para os sistemas AVAC, Verão, Laboratório, Sul	62
Figura 5.55 - Comparação do PMV para os sistemas AVAC, Verão, Laboratório, Norte.....	62

Figura 5.56 - Comparação do PPD para os sistemas AVAC, Verão, Gabinete, Este.....	63
Figura 5.57 - Comparação do PPD para os sistemas AVAC, Verão, Gabinete, Oeste	63
Figura 5.58 - Comparação do PPD para os sistemas AVAC, Verão, Gabinete, Sul.	63
Figura 5.59 - Comparação do PPD para os sistemas AVAC, Verão, Gabinete, Norte.	63
Figura 5.60 - Comparação do PPD para os sistemas AVAC, Verão, Laboratório, Este.	64
Figura 5.61 - Comparação do PPD para os sistemas AVAC, Verão, Laboratório, Oeste.	64
Figura 5.62 - Comparação do PPD para os sistemas AVAC, Verão, Laboratório, Sul.....	64
Figura 5.63 - Comparação do PPD para os sistemas AVAC, Verão, Laboratório, Norte.....	64
Figura 5.64 - Comparação do PMV para os sistemas AVAC, Inverno, Gabinete, Este.....	66
Figura 5.65 - Comparação do PMV para os sistemas AVAC, Inverno, Gabinete, Oeste	66
Figura 5.66 - Comparação do PMV para os sistemas AVAC, Inverno, Gabinete, Sul	67
Figura 5.67 - Comparação do PMV para os sistemas AVAC, Inverno, Gabinete, Norte	67
Figura 5.68 - Comparação do PMV para os sistemas AVAC, Inverno, Laboratórios, Este.....	68
Figura 5.69 - Comparação do PMV para os sistemas AVAC, Inverno, Laboratórios, Oeste	68
Figura 5.70 - Comparação do PMV para os sistemas AVAC, Inverno, Laboratórios, Sul	69
Figura 5.71 - Comparação do PMV para os sistemas AVAC, Inverno, Laboratórios, Norte	69
Figura 5.72 - Comparação do PPD para os sistemas AVAC, Inverno, Gabinete, Este.....	69
Figura 5.73 - Comparação do PPD para os sistemas AVAC, Inverno, Gabinete Oeste.....	69
Figura 5.74 - Comparação do PPD para os sistemas AVAC, Inverno, Gabinete, Sul	70
Figura 5.75 - Comparação do PPD para os sistemas AVAC, Inverno, Gabinete, Norte.....	70
Figura 5.76 - Comparação do PPD para os sistemas AVAC, Inverno, Laboratórios, Este	70
Figura 5.77 - Comparação do PPD para os sistemas AVAC, Inverno, Laboratórios, Oeste.....	70
Figura 5.78 - Comparação do PPD para os sistemas AVAC, Inverno, Laboratórios, Sul	71
Figura 5.79 - Comparação do PPD para os sistemas AVAC, Inverno, Laboratórios, Norte.....	71

Índice de Tabelas

Tabela 2.1 - Padronização de atividade metabólica	5
Tabela 2.2 - Padronização do vestuário.....	5
Tabela 2.3 - Escala sensações térmicas da ASHRAE	6
Tabela 2.4 - Coeficientes cálculo PMV.....	8
Tabela 2.5 - Zonas de conforto. DR, risco de resfriamento; PPD, percentagem de pessoas insatisfeitas; PMV, voto médio estimado.....	9
Tabela 2.6 - Comparação entre o método de camaras climatizadas e o método de campo	10
Tabela 2.7 - Fatores influentes na qualidade do ar em edifícios	12
Tabela 2.8- Tipos de ligações em coletores solares	18
Tabela 3.9 - Número de compartimentos em cada um dos edifícios.....	27
Tabela 3.10 - Descrição completa dos compartimentos estudados.	28
Tabela 4.11 - Dados de entrada.....	29
Tabela 4.12 - Coletores implementados	32
Tabela 4.13 - Ocupação máxima de cada compartimento (nº de ocupantes)	33
Tabela 4.14 - Ocupação do edifício ao longo do dia por compartimento.....	33
Tabela 4.15 - Imagem do ficheiro criado para representar a utilização de AVAC do edifício	34
Tabela 4.16 - Ventilação (m ³ /s) de entrada no edificio	35
Tabela 4.17 - Exemplos de caudais da VS	39
Tabela 4.18 - Exemplos de caudais da ventilação estufas internas (VG).....	40
Tabela 5.19 - Energia produzida nos coletores por dia	45
Tabela 5.20 - Produção de energia térmica nas células fotovoltaicas (Verão e Inverno).....	46
Tabela 5.21- Resultados obtidos, relevantes para a análise do conforto térmico e qualidade do ar (Verão)	54
Tabela 5.22 - Compartimentos com maior velocidade do ar para as ventilações VG1 e VG2 no mecanismo de jatos descendentes.	57
Tabela 5.23 - Resultados obtidos, relevantes para a análise do conforto térmico e qualidade do ar (Inverno).....	58
Tabela 5.24 - Horas de Frio para os diferentes sistemas de ventilação e de climatização AVAC	65
Tabela 5.25 - Horas de frio dos sistemas de climatização de ventilação abordados no capítulo	71
Tabela 5.26 - Energia térmica consumida pelos sistemas de climatização AVAC.....	72
Tabela 5.27 - Necessidade energética para a climatização e produção de energia dos coletores.....	73
Tabela 5.28 - Consumo energético da iluminação do edificio	73

Tabela 5.29 - Energia consumida pelo sistema de iluminação e produção das células fotovoltaicas ...	74
Tabela 6.30 - Energia necessária para a climatização e produção dos coletores.....	75
Tabela 6.31 – Consumos de energia dos laboratórios e gabinetes no Verão.....	76
Tabela 6.32 - Energia produzida pelas células fotovoltaicas e energia consumida pelos sistemas de iluminação e informática.....	76

Lista de Siglas

3D	3 Dimensões
AC	Corrente Alternada
AVAC	Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
CE	Compartimento Estufa
CF	Compartimentos Frios
COP	<i>Coefficient Of Performance</i>
CQ	Compartimentos Quentes
CS	Compartimento Subterrâneo
EER	<i>Energy Efficient Rate</i>
FCT	Faculdade de Ciências e Tecnologias
JD	Mecanismo de Ventilação com Jatos descendentes
m-SI	Silício Monocristalino
MV	Voto Médio
PMV	<i>Predicted Mean Vote</i>
PPD	<i>Predicted Percentage of Dissatisfied</i>
p-SI	Silício Policristalino
QAI	Qualidade do Ar Interior
TR1	Caudal de 10L/s e uma taxa de infiltração de uma renovação por hora
TR2	Caudal de 20L/s e uma taxa de infiltração de duas renovações por hora
VE	Ventilação Exterior
VE1	Ventilação Exterior 1
VE2	Ventilação Exterior 2
VG	Ventilação Estufas Internas
VG1	Ventilação Estufas Internas 1
VG2	Ventilação Estufas Internas 2

VI	Ventilação por Impulso
VS	Ventilação Subterrânea
VS1	Ventilação Subterrânea 1
VS2	Ventilação Subterrânea 2

1 Introdução

A procura de uma rentabilização energética em espaços escolares tem vindo a aumentar, tanto devido à questão ambiental como à económica. Contudo, quando se pretende reduzir o consumo de energia de um edifício deve-se ter em consideração questões como o conforto térmico ou a qualidade do ar interior, pois estas são duas variáveis essenciais para a concretização do bem-estar num espaço edificado.

Neste capítulo é efetuada uma breve descrição acerca do interesse do tema na perceção atual. Para além disso, são também apresentados os objetivos do estudo.

1.1 Necessidade do estudo

Nos dias de hoje, o Homem passa grande parte do seu tempo dentro de espaços edificados, surgindo a necessidade de garantir que estes tenham as condições necessárias para uma boa qualidade de vida. No entanto, para garantir essas condições houve a necessidade de recorrer a sistemas de climatização que proporcionassem o conforto desejado. Deste modo as tecnologias destinadas ao conforto interior estão associadas às maiores percentagens de gastos energéticos num edifício (*Lam et al., 2009*). Em geral, nos países desenvolvidos esta fatia chega a ser metade da energia total consumida pelo edifício (*Chu et al., 2013*) Associado a esta nova exigência da sociedade em ter espaços confortáveis termicamente surgem outras temáticas, a qualidade do ar interior e a eficiência energética do edifício.

A preocupação com a qualidade do ar interior surge no contexto de uma realidade atual. Parte das doenças são contraídas em ambientes internos, sendo os hospitais os espaços onde a percentagem de contaminação é maior. Contudo estes não são os únicos sujeitos a um mau ambiente interno. Fatores como ventilação, condições de limpeza, características de construção, produtos usados em residências, hábitos culturais, clima e qualidade do ar exterior influenciam a qualidade do ar interior (*Antunes, 2014*). Assim, qualquer edifício que funcione sem ter em consideração estes fatores pode tornar-se num foco de contaminação.

Em Portugal, o sector residencial, com aproximadamente 3,3 milhões de edifícios, é responsável pelo consumo de 17% da energia primária, representando cerca de 29% do consumo total de energia elétrica do país (*DGE, 2002*). Este valor sobe quando apresentado à escala europeia, sendo cerca de 40% o gasto energético dos edifícios em toda a Europa. Estes valores são reveladores da necessidade de mudar o paradigma, assim a redução do consumo de energia e a utilização de energia proveniente de fontes renováveis no sector imobiliário

constituem medidas importantes para reduzir a dependência energética da União Europeia e a consequente emissão de gases com efeito de estufa. Só assim será possível honrar os seus compromissos a longo prazo de manter a subida da temperatura global abaixo dos 2 °C e reduzir até 2020 as emissões globais de gases com efeito de estufa em pelo menos 20 % em relação aos níveis de 1990 (Frota et al, 1987)

Como se verifica os imóveis têm uma grande expressão no gasto de energia, cada vez mais se procuram alternativas para diminuir esse consumo. Segundo *Deng et al.* (2011), a componente mais importante na construção de um edifício sustentável é a capacidade do mesmo em utilizar a sua própria energia nos sistemas de aquecimento e arrefecimento. De forma a obter o melhor rendimento do edifício devem ser utilizadas as energias renováveis aliadas aos sistemas de aquecimento, ventilação e ar condicionado (AVAC) (Ozgener, 2006)

Dados da DGEG (2016) demonstram que em Portugal, de 2013 para 2014 houve uma redução do consumo e energia primária de 2,8%, mantendo-se o mesmo consumo final de energia. Para além disso houve uma diminuição da dependência de energia exterior, passando de 88,8% em 2005 para 72,4% em 2014. Estes números são reveladores da mudança de atitude dos Portugueses, pois este decréscimo na importação de energia está ligado ao aumento da produção doméstica de energia que passou de 13% em 2005 para 28% em 2014. Naturalmente que as mudanças de comportamentos notaram-se na redução de emissões de gases de efeito de estufa, diminuindo 25,9% entre anos de 2005 e 2013. No entanto, apesar da grande melhoria na redução de importação de energia, comparativamente com a Europa, Portugal está acima da média que ronda os 50% de energia importada.

1.2 Objetivos

Esta dissertação tem como objetivo o estudo da sustentabilidade energética num edifício escolar. Tendo como principais recursos, a implementação de um sistema de ventilação capaz de aproveitar a capacidade térmica dos compartimentos e a utilização de energia Solar para auxiliar na climatização do edifício. Pretende-se, através do *software efficient buildings*, alcançar e garantir a existência de conforto térmico e qualidade do ar no interior do mesmo.

2 Enquadramento Teórico

Neste capítulo pretende-se explicar algumas das temáticas mais relevantes para o estudo realizado, o capítulo divide-se em 4 temas principais: Conforto Térmico, Qualidade do ar, Ventilação, e Energias Renováveis.

2.1 Conforto Térmico

O conforto térmico é uma sensação humana que pode variar ligeiramente de pessoa para pessoa, muitas vezes um espaço é confortável para umas pessoas e desconfortável para outras, fator que revela alguma subjetividade, dificultando a padronização. Essa variação de sensações depende de fatores físicos, fisiológicos e psicológicos. Os físicos correspondem às trocas de calor entre o corpo e o espaço, os fisiológicos referem-se à resposta do organismo quando exposto a uma determinada condição térmica e os psicológicos são relativos à percepção e resposta a estímulos sensoriais, variando de pessoa para pessoa consoante a sua experiência e expectativa (Cooper et al., 1997). Segundo a ASHRAE (2004) conforto térmico é definido como “A condição da mente que expressa satisfação com o ambiente térmico”.

Como foi referido o conforto térmico pode ser um conceito não exato. No entanto há fatores quantificáveis, através dos quais é possível analisar o comportamento do indivíduo no interior do edifício. No plano individual podem ser considerados o peso, vestuário e a taxa metabólica, relativamente a parâmetros ambientais deve-se analisar a temperatura do ar, a temperatura média radiante, velocidade e humidade do ar. (Fanger, 1972). Estes fatores devem ser estudados de forma a obter o maior equilíbrio térmico possível. Quando existe a percepção psicológica desse equilíbrio, pode-se falar de conforto térmico, que é definido pela ISO 7730 como “um estado de espírito que expressa satisfação com o ambiente que envolve uma pessoa (nem quente nem frio) ”.

2.1.1 Parâmetros ambientais influentes no conforto térmico

Existem quatro parâmetros essenciais no estudo do conforto térmico no interior de um edifício, a temperatura do ar, a temperatura radiante, a humidade relativa e a velocidade do ar. (Parsons, 2003) Estes são definidos pela ASHRAE (2004) da seguinte forma:

- **Temperatura do ar:** este parâmetro é definido como a temperatura que envolve o ocupante, esta é determinada em graus *Kelvin* (K), *Fahrenheit* (F) ou *Celsius* (C);

- **Temperatura média radiante:** Temperatura de superfície uniforme de um invólucro imaginário preto em que um ocupante trocava a mesma quantidade de calor radiante, como no espaço real não uniforme;
- **Humidade relativa:** Razão entre a pressão parcial (ou densidade) do vapor de água no ar com a pressão de saturação (ou densidade) do vapor de água à mesma pressão e temperatura;
- **Velocidade do ar:** Taxa de circulação de ar num ponto, sem ter em consideração a direção, segundo a ASHRAE (2003) a velocidade máxima num edifício não deve exceder os 0,8 m/s.

Das variáveis explicadas, uma das mais influentes no conforto térmico em edifícios é a temperatura do ar do espaço edificado. No entanto essa condição térmica interna depende em muito do que se passa no exterior do edifício, o impacto das condições externas pode se fazer sentir no conforto interior de três formas (Raja et al., 1998):

1. Transmissão do ambiente externo através da estrutura do edifício. A envolvente do edifício modifica a transmissão de acordo com a sua massa térmica e isolamento;
2. Transmissão de energia solar através de áreas abertas ou envidraçadas, podendo esta ser controlada pelo uso de persianas, cortinas ou vidros;
3. A infiltração do ar exterior através de portas, janelas, rachaduras e buracos. O uso de controlos de janelas de ar, ventilação de ar e isolamento apropriado podem ajudar na redução da infiltração.

2.1.2 Variáveis Individuais influentes no conforto térmico

A taxa metabólica e o vestuário são duas variáveis que devem ser consideradas no estudo do conforto térmico, estas podem variar com a atividade e com a estação do ano, respetivamente.

Taxa metabólica

Esta é definida segundo a ASHRAE (2004) como uma taxa de produção de energia do corpo (metabolismo), que varia com a atividade do indivíduo. A unidade utilizada para caracterizar a atividade metabólica (Tabela 2.1) é o met, que corresponde a $59,2 \text{ W/m}^2$, que é a energia produzida por área superficial do corpo, em média $1,8 \text{ m}^2$ (Cooper et al., 1997)

Tabela 2.1 - Padronização de atividade metabólica

Atividade	Met
Dormir	0.7
Sentado	1
Escrever	1.1
Conduzir	1.2
Cozinhar	1.6 – 2
Andar (1,2m/s)	2.6
Dançar	2.4 – 4.4
Desportos	3.6 – 8.6

Fonte: Adaptado de Ashrae (1997)

Vestuário

O equilíbrio térmico de um indivíduo está diretamente relacionado com o seu vestuário (Tabela 2.2), como cada tipo de roupa oferece uma resistência diferente às trocas de calor entre o corpo e o ambiente, este isolamento térmico torna-se numa variável com significância no estudo do conforto térmico. Assim, através de uma experiência com manequins aquecidos conseguiu-se padronizar a variável, representando-a por “clo”, a tabela seguinte é elucidativa do isolamento térmico de diversos tipos de vestuários (Cooper et al., 1997).

Tabela 2.2 - Padronização do vestuário

Vestuário	Clo
Nu	0
Calções	0,1
Roupa tropical	0,3
Roupa de verão moderado	0,5
Roupa de trabalho	0,8
Roupa de inverno moderado	1
Fato	1,5

Fonte: Adaptado de *Olesen et al.*,(1982)

2.1.3 Métodos de estudo de conforto térmico

Atualmente existem duas abordagens específicas para a definição de conforto térmico, uma tem por base o uso de câmaras climatizadas, onde o ambiente térmico pode ser facilmente controlado, outra com base em ambientes reais, que assenta na recolha de dados de campo relativos aos ocupantes do edifício (Alison et al., 2010)

Método câmaras climatizadas

Este método de análise de conforto térmico baseia-se nas experiências de *Fanger* em ambientes térmicos controlados. Utilizando um modelo de transferência de calor em estado estacionário, analisaram-se os comportamentos de estudantes, vestidos com roupas (clo) e atividades (met) padrão, expostos a diferentes ambientes térmicos. Os participantes encontravam-se em condições térmicas pré-definidas e tinham que descrever as sensações que tinham numa escala (*ASHRAE thermal sensation scale rating*), de 7 pontos, variando de muito quente (-3) a muito frio (+3). A tabela seguinte demonstra as variações da escala referida.

Tabela 2.3 - Escala sensações térmicas da ASHRAE

Sensações	Escala (ASHRAE)
muito quente	3
quente	2
ligeiramente quente	1
neutro	0
ligeiramente frio	-1
frio	-2
muito frio	-3

Fonte: Adaptado de ISO 7730, 2005

Noutros estudos também realizados, os estudantes, ao invés de estarem em condições pré-definidas, podiam escolher as condições térmicas que desejassem até se encontrarem num estado de desconforto térmico nulo, isto é, zero na escala *ASHRAE thermal sensation scale rating* (Charles, 2003).

O modelo de *Fanger* combina as teorias de balanço térmico com a fisiologia de termorregulação, para deste modo determinar a escala de temperaturas definidas como confortáveis pelos ocupantes do edifício. De acordo com essa teoria o corpo humano atua de forma fisiológica para combater o desconforto térmico através do suor, do tremer e da regulação de fluxo sanguíneo para a pele. Desta forma é possível manter um equilíbrio

relativamente à temperatura que é perdida pelo corpo, esse o equilíbrio é a condição principal para manter um desconforto térmico neutro (Fanger, 1967)

Com o objetivo de manter a neutralidade térmica, *Fanger* determinou que neste contexto os únicos processos fisiológicos com influência no balanço térmico são a taxa de suor e a temperatura média da pele. No entanto verificou-se que estes processos estão relacionados com a atividade dos ocupantes, num estudo realizado com estudantes expostos a diferentes condições térmicas enquanto usavam roupas idênticas, *Fanger* determinou a existência uma relação linear entre o nível de atividade e o suor. Num estudo posterior realizado pelo mesmo, estudantes foram expostos a condições de vestuário e térmicas idênticas, mas com níveis de atividade diferentes (sedentária baixa, média, elevada) de forma a derivar uma relação linear entre os níveis de atividade e a temperatura média da pele. Posteriormente *Fanger* enquadrou as duas relações lineares (nível de atividade e suor; nível de atividade e temperatura média da pele) numa equação de balanço térmico, obtendo a equação de conforto térmico. (Fanger, 1967)

A equação de conforto térmico obtida por Fanger foi relacionada com a escala de 7 pontos da ASHRAE *thermal sensation scale* e ficou conhecido como índice *Predicted Mean Vote* (PMV), que posteriormente foi incorporado no índice *Predicted Percentage of Dissatisfied* (PPD). Este modelo PMV-PPD tem sido essencial na evolução da teoria acerca do conforto térmico, sendo amplamente aceite e usado em casos de estudo (Lin & Deng, 2008).

- PMV

O índice PMV prevê a resposta média de um largo grupo de pessoas de acordo com a escala de sensação térmica da ASHRAE. Os ocupantes são questionados acerca da sensação térmica de acordo com a escala de 7 pontos, desde muito quente (+3) a muito frio (-3). O voto médio (MV) é obtido pela média da sensação obtida pelos ocupantes a uma determinada temperatura. *Fanger* conseguiu relacionar o desequilíbrio entre o fluxo de calor a partir de um corpo humano num determinado ambiente com o fluxo de calor necessário para um conforto ótimo em determinada atividade, resultando na seguinte equação (Lin & Deng, 2008):

$$PMV = [0,303 \cdot \exp. (-0,036 \cdot M) + 0,028] \cdot L \quad (1)$$

Onde:

PMV= voto médio estimado, adimensional.

L = carga térmica do corpo, W/m²

M = taxa metabólica de produção de calor em função da atividade, W/m².

O instituto de pesquisa ambiental da Universidade de Kansas, sob contrato com a ASHRAE, desenvolveu uma extensa investigação relacionada com o conforto térmico em estado estacionário. O objetivo incidia na formulação de uma equação que expressasse o PMV em parâmetros facilmente abordados num ambiente (Tabela 2.4). Resultando a expressão seguinte (Orosa, 2009):

$$PMV = aT + bPv - c \quad (2)$$

Onde:

P_v = pressão do vapor de água no ar ambiente;

T = temperatura;

Os coeficientes *a, b* e *c* são fornecidos pela tabela 2.4

Tabela2.4 - Coeficientes cálculo PMV

Tempo (h)	Género	a	b	c
1	masculino	,220	,233	,673
	feminino	,272	,248	,245
	ambos	,245	,248	,475
2	masculino	,221	,270	,024
	feminino	,283	,210	,694
	ambos	,252	,240	,859
3	masculino	,212	,293	,949
	feminino	,275	,255	,620
	ambos	,243	,278	,802

Fonte: Adaptado de Orosa, 2009

Com este critério, foi definido uma zona de conforto, com condições de temperatura de 26°C e de Humidade relativa de 50%. Este estudo foi redigido com foco em ocupantes com atividade metabólica sedentária, vestuário normal (resistência térmica de aproximadamente 0.6 clo) e com exposição a ambiente interior de 3h (Orosa, 2009).

- PPD

O PPD prevê a percentagem de pessoas que se sentem com mais do que ligeiro frio ou calor (ex. percentagem de pessoas que se queixa do ambiente interior). Usando a escala de 7 pontos de sensação térmica (-3 até +3), são classificados como desconforto aqueles que responderem: -3;-2;+2;+3. Os restantes são declarados como estando em ambiente térmico confortável (Figura 2.1) (ISO, 2005).

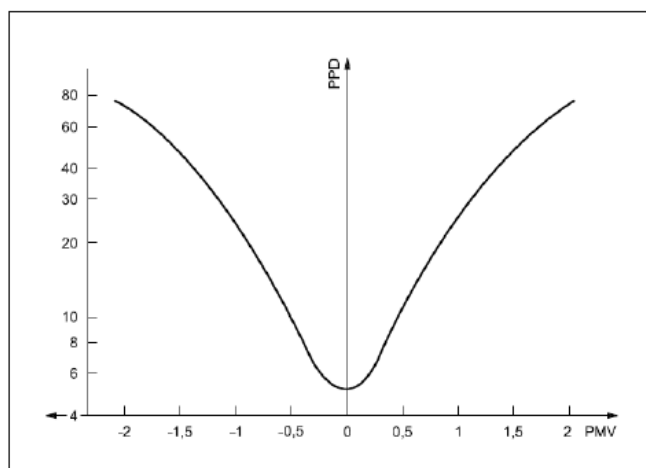


Figura 2.1 - Relação PPD vs PMV

Fonte: adaptado de ISO, 2005

A relação entre PPD e PMV é representada na seguinte expressão:

$$PPD = 100 - 95 \exp [-(0,03353 \cdot PMV^4 + 0,2179 \cdot PMV^2)] \quad (3)$$

Esta relação é importante na medida em que demonstra a perfeita simetria com respeito à neutralidade térmica (PMV=0). Pode ser verificado na figura 2.1 que, mesmo quando a o índice PMV é 0, existem alguns indivíduos que insatisfeitos com a temperatura, contudo todos estão vestidos com a mesma roupa e sujeitos à mesma atividade. Isto demonstra que o conforto varia de pessoa para pessoa e que mesmo com PMV=0, o nível de insatisfação pode ir até aos 5%.

Dependendo das margens PPD e PMV aceitáveis, existem três zonas de conforto (tabela 2.5) (ISO 7730, 2005)

Tabela 2.5 - Zonas de conforto. DR, risco de resfriamento; PPD, percentagem de pessoas insatisfeitas; PMV, voto médio estimado.

Categoria	PPD	Margem PMV	DR (%)
------------------	------------	-------------------	---------------

A	<6	0.2<PMV<0.2	<10
B	<10	0.5<PMV<0.5	<20
C	<15	-0.7<PMV<0.7	<30

Fonte: Adaptado de ISO 7730, 2005

Método de campo (ambiente reais)

Esta metodologia deriva de estudos de campo, com o intuito de analisar a aceitação real do ambiente térmico, o que depende fortemente do contexto, das expectativas e do comportamento dos ocupantes. As variáveis foram devidamente sumarizadas por *De Dear* (2004) em três categorias: adaptação comportamental, fisiológica e psicológica.

Este tipo de abordagem permite analisar outros fatores, comparativamente aqueles que podem ser analisados em simulação (câmaras climatizadas), permite verificar as respostas consoante os hábitos do dia-a-dia, vestindo roupas diferentes e tendo comportamentos sem restrições (Cena & DeDear, 2001).

Esta metodologia é considerada adaptativa, por analisar os sujeitos em estudo como seres ativos (adaptáveis). Assim considera-se que estes não são passivos em relação às condições térmicas no interior do edifício, sendo capazes de abrir uma janela, vestir um casaco, entre outras atividades, sempre em busca de condições mais adequadas para atingirem uma sensação de conforto térmico ideal (Nicol & Pagliano, s.d.).

Esta manipulação do conforto sentido pelo ocupante relativa a este modelo, proporciona discrepâncias em comparação com o modelo de camara climatizada (índice PMV), estas são designadas como erros adaptativos (Baker & Standeven, 1996). A tabela seguinte demonstra as diferenças de parâmetros que se verificam quando os ocupantes estão num regime ativo, capazes de se adaptar para melhorar as condições no interior do edifício.

Tabela 2.6 - Comparação entre o método de camaras climatizadas e o método de campo

Parâmetros	Situação Base	Situação Adaptativa
Temperatura do quarto, ar (°C)	30,5	29,5
Temperatura do quarto, radiante (°C)	30,5	29,5
Temperatura localizada, ar (°C)	30,5	28,0
Temperatura localizada, radiante (°C)	30,5	28,0
Velocidade do ar (m/s)	0,1	0,2
Vestuário (clo)	0,5	0,4
Atividade (met)	1,2	1,1
PPD (%)	68,4	17,5

Fonte: Adaptado de Baker & Standeven, 1996

É possível observar as diferenças relativas à oportunidade adaptativa, a maior é verificada no índice PPD, notando-se uma grande diminuição de pessoas insatisfeitas. Mais ainda, o efeito da oportunidade adaptativa verifica-se também nas zonas de conforto, estas são maiores quanto maior for a liberdade do ocupante em controlar as condições (Baker & Standeven, 1996).

2.1.4 Desconforto térmico local

O PMV e o PPD são definidos para o desconforto em todo o corpo. No entanto o desconforto térmico pode ser sentido em apenas certas partes do corpo, sensação que deu origem ao estudo do desconforto térmico local. Este é na maioria das vezes causado por correntes de ar ou por variações verticais de temperatura, que por sua vez podem ter origem na utilização de determinados tipos de climatização. Nesse sentido verifica-se a importância de uma boa climatização, que seja eficaz e capaz de evitar as variações de temperatura dentro de um espaço edificado (ISO, 2005).

Esta sensação é majoritariamente sentida por pessoas com atividade ligeiramente sedentária, devido à inabilidade do organismo neutralizar a temperatura nessas condições. Verifica-se que em pessoas com altos níveis de atividade a probabilidade de sensação de desconforto localizado é muito inferior (ISO, 2005).

2.1.5 Risco de resfriamento

Segundo a ISO 7730, as correntes de ar sentidas no interior de um edifício podem ser expressadas através de equação, esta é expressa em termos de pessoas incomodadas pela sensação de desconforto. O cálculo do risco de resfriamento pode ser efetuado da seguinte forma:

$$DR = (34 - t)(v - 0,05)^{0,62} \cdot (0,37 \cdot v \cdot Tu + 3,14) \quad (4)$$

Onde:

t = temperatura local (°C);

v = velocidade do ar (m/s);

Tu = intensidade da turbulência (%), usar 40% quando desconhecido.

Para: v < 0,05 m/s, usar v = 0,05 m/s; DR > 100%, usar DR = 100%

Este modelo é referente a pessoas em condição de atividade ligeiramente sedentária, onde a temperatura do corpo é homogênea, exceto no pescoço, zona onde será sentido o desconforto causado pela corrente de ar. Os braços e os pés também podem ser alvo de

resfriamento, relativamente a estes, o modelo é capaz de sobrestimar a taxa de corrente de ar previsível (ISO 7730, 2005).

2.2 Qualidade do ar interior

A qualidade do ar interior tem vindo a deteriorar-se com o passar dos anos, podem especular-se os motivos, mas esta conjectura deve-se em muito à mudança de paradigma da sociedade. Dois fatores estão certamente relacionados, o primeiro deve-se ao facto de os edifícios atualmente serem construídos a pensar no consumo, resultando num isolamento extremo do mesmo de forma a impedir as trocas de ar com o exterior (Lonescu et al., 2015), juntando a isso o facto de o ser humano passar cada vez mais tempo, cerca de 90% (EEA, 2007), dentro de espaços edificados o resultado só pode ser uma diminuição da qualidade do ar.

Mais concretamente em escolas, onde a ocupação pode ser bastante significativa, resultando num aumento considerável do dióxido de carbono (Chatzidiakou, 2014). No entanto para além do CO₂, existem muitos compostos perigosos que podem fazer parte do interior de um edifício, resultantes de materiais de construção, produtos de limpeza, combustões, produtos de consumo, bactérias, fungos e até bolores (APA, 2009).

Como referido acima existe uma variedade de compostos que podem afetar a Qualidade do Ar Interior (QAI), a tabela seguinte demonstra as fontes e os fatores responsáveis.

Tabela 2.7 - Fatores influentes na qualidade do ar em edifícios

Fator	Fonte
Temperatura e valores extremos de humidade	Deficiente controlo de humidade, incapacidade do edifício em compensar climas extremos, densidade de equipamentos instalados e ocupação.
Dióxido de carbono	Número de pessoas.
Formaldeído	Madeira prensada, contraplacado não selado, isolamento de espuma de ureia - formaldeído, tecidos, cola, carpetes, mobiliário, papel químico.
Partículas	Fumo, entradas de ar, papel, isolamento de tubagens, resíduos de água, carpetes, filtros de AVAC, limpezas.
Compostos Orgânicos Voláteis	Fotocopiadoras e impressoras, computadores, carpetes, mobiliário, produtos de limpeza, fumo de tintas, adesivos, calafagem, perfumes, laca, solventes.
Ventilação inadequada	Medidas de poupança de energia e manutenção, má conceção do projeto do sistema AVAC, alteração do sistema de funcionamento do AVAC pelos ocupantes, conceção desajustada dos espaços em avaliação
Matéria microbiana	Água estagnada em sistemas de AVAC, materiais molhados e húmidos, desumidificadores, condensadores das torres de arrefecimento, torres de refrigeração.

Fonte: Adaptado de APA, 2009

Num espaço fechado com ocupantes é natural que os níveis de CO₂ subam por consequência da respiração do Homem. Deste modo, a ventilação é o processo importante, pois permite a troca do ar interior poluído por ar fresco e limpo do exterior. Estudos demonstram que existe uma relação inversamente proporcional entre a taxa de ventilação e os níveis de CO₂, a figura seguinte permite verificar essa relação, onde se verifica que à medida que aumenta a taxa de ventilação, a concentração de CO₂ no interior diminui (Chatzidiakou, 2014).

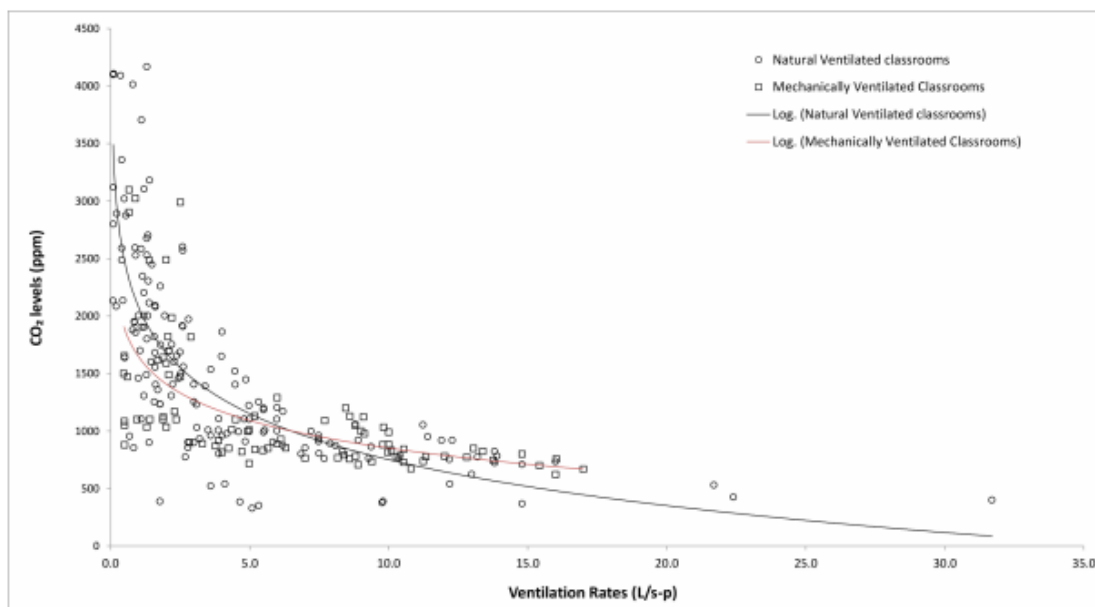


Figura 2.2 - Relação entre a ventilação e os níveis de Dióxido de Carbono

Fonte: Chatzidiakou, 2012

Verificando-se esta relação, percebe-se a importância da ventilação para a concretização de um ambiente interior saudável. Os níveis de CO₂ variam consoante o local, ocorrência ou hora do dia, tendo a tendência a aumentar ao longo do dia. Segundo a ASHRAE (2003), a taxa mínima de ventilação para garantir uma qualidade do ar interior no local de trabalho com utilização de computadores é de 10 l/s por ocupante. Resultando numa concentração de CO₂ de aproximadamente 850 ppm, em condições de estado estacionário (APA, 2009). No que diz respeito a limites relativos à concentração de CO₂ no interior de um edifício, é aconselhado um limiar de proteção de 1250 ppm, o equivalente a 2250 mg/m³ (Decreto Lei nº118/2013 de 20 de Agosto do Ministério do Ambiente, Ordenamento do Território e Energia, da Saúde e da Solidariedade, Emprego e Segurança Social, 2013).

2.3 Ventilação

A ventilação pode ser definida como o conjunto de processos responsáveis pelos fluxos de ar entre o interior e o exterior do edifício. Esta pode ser dividida em natural e mecânica, a natural ocorre através da produção de diferenciais de pressão, enquanto a mecânica depende da introdução de ventiladores e condutas para a circulação do ar, essencialmente duas, uma para admissão e outra para a exaustão (ASHRAE, 1997).

A ASHRAE define ventilação natural como movimento de ar entre o interior e o exterior de um espaço essencialmente através de aberturas intencionais (por exemplo, janelas e portas), ventiladores sem motor, ou por infiltração. A infiltração é o único processo de ventilação involuntário, que deste modo é dificilmente controlável. Este fenómeno afeta tanto a qualidade do ar interior, como o consumo energético do edifício, este pode ocorrer devido a falhas de construção, como fendas na estrutura do edifício (Sherman, 2009).

A ventilação mecânica é um processo de fornecer ou retirar ar de um espaço de forma voluntária através de um equipamento motorizado. A utilização de ventiladores de turbinas eólicas e de janelas operadas mecanicamente não são consideradas como ventilação mecanizada (ASHRAE,s.d.).

Sendo a ventilação a principal forma de renovação do ar no interior de qualquer espaço, esta pode ter um papel essencial tanto na qualidade do ar no interior como no conforto térmicos do edifício, assim em primeiro plano a ventilação é utilizada para diluição dos poluentes existentes, em segundo para garantir uma melhoria das condições térmicas, sendo desta forma garantido um ambiente interior mais saudável, evitando assim a contaminação dos ocupantes do edifício.

No entanto, segundo a ASHRAE (s.d.) apesar da importância que a ventilação tem na melhoria da qualidade do ar, esta não é capaz de remover totalmente os poluentes existentes, mas sim diminui-los para valores razoáveis.

Na análise da ventilação em espaços edificados devem ser considerados três elementos básicos (ASHRAE, s.d.):

- Taxa de ventilação: A quantidade de ar exterior que é fornecido ao edifício, bem como a sua qualidade.

- Direção da ventilação: A direção da ventilação é essencial para garantir qualidade do ar interior, pois esta deve sempre circular das zonas mais limpas para as zonas mais poluídas;
- Distribuição do ar: O ar exterior deve ser distribuído para cada espaço do edifício de forma eficiente, isto é, devem ser bem estudados os circuitos de ventilação de forma a garantir a eficiência do sistema, assim como a remoção dos poluentes dos mesmos espaços deve ser executada de maneira eficiente.

2.3.1 Ventilação para a qualidade do ar interior

A ventilação é um processo de fornecimento e remoção do ar no interior do edifício, estas trocas resultam numa eventual mistura com um porção de ar interior e outra de ar exterior. A importância da ventilação na qualidade do ar verifica-se na remoção de poluentes, por exemplo, o dióxido de carbono está em constante aumento no interior de um edifício, resultado da respiração humana. Assim deve ser garantida uma taxa de renovação do ar, para diluir e eventualmente remover contaminantes do interior, esta pode ser garantida recorrendo a sistemas de climatização capazes de introduzir quantidades adequadas de ar exterior. No entanto, estas trocas de ar com exterior, podem piorar as condições térmicas no interior do edifício, ficando mais frio no inverno e mais quente no verão. Deste modo deve ser introduzida no edifício apenas a quantidade necessária para a remoção dos poluentes existentes, que pode ser calculada tendo em consideração o número de pessoas no edifício ou o volume do mesmo (EPA, 1990).

A ventilação de um espaço pode ser efetuada de duas formas, tendo em consideração o número de pessoas no compartimento ou o volume do mesmo. A primeira expressa-se da seguinte forma (WHO, 2009):

$$Vent(m^3/s) = \frac{n^{\circ}pessoas * taxa\ de\ ventilação\ (L/s)}{1000(L/m^3)} \quad (5)$$

Como já foi referido anteriormente, a taxa de ventilação deve ser de 10 L/s, por pessoa (ASHRAE, 2003). A segunda forma de calcular a renovação do ar, tendo em consideração o volume expressa-se pela equação seguinte:

$$Vent(m^3/s) = \frac{Volume\ compartimento(m^3) * taxa\ de\ renovação/h}{3600(s/h)} \quad (6)$$

Onde a taxa de renovação representa o número de renovações que se pretende para o espaço numa hora.

2.3.2 Ventilação para conforto térmico

Existem diversas formas de melhorar as condições no interior de um edifício, uma das variáveis que tem um especial impacto é definitivamente a ventilação, que para além disso pode também ser de extrema importância no que diz respeito ao consumo energético. Relativamente ao melhoramento das condições térmicas no interior, a ventilação consegue de certa forma equilibrar termicamente o edifício, isto é, através de sistemas mecânicos fazer circular o ar das zonas mais frias para as mais quentes e vice-versa de modo a obter as condições ideais consoante desejado. Estes tipos de estratégias são essenciais na redução do consumo energético do edifício. Existem diversas formas de ventilar um edifício (Homes & Hacker, 2007):

- Ventilação natural: Ventilação controlada pelos ocupantes do edifício, através da abertura de janelas;
- Ventilação natural avançada: Ventilação que envolve uma estratégia de fluxo e direcção do ar através de forças naturais e condutas apropriadas;
- Ventilação mecânica: Este sistema envolve a utilização de um ventilador central que fornece ar ao restante edifício;
- Sistema misto: Inclui um dos sistemas de ventilação descritos acima, com a adição de um sistema de refrigeração mecânica;
- Sistema completo: neste método é utilizado o sistema de aquecimento ventilação e ar condicionado (AVAC) no controlo do ambiente térmico do edifício, este sistema permite uma rentabilização dos gastos energéticos associados à climatização do edifício, isto se for bem definido o plano estratégico do funcionamento do sistema.

2.4 Energia Solar

A energia solar é uma das fontes de energia mais limpas, esta é uma das energias renováveis que apresenta maiores vantagens, isto porque para além de ser uma boa alternativa ao uso de combustíveis fósseis não apresenta qualquer transtorno ambiental. Mais ainda, ao contrário de outras tecnologias, esta não tem um especial impacto na paisagem, pode ser

enquadrada no sistema paisagístico sem ter grandes consequências visuais. Em título de curiosamente, revelador das potencialidades desta energia, sabe-se que o sol irradia mais energia num segundo do que aquela que a humanidade usou desde o início da civilização (Solangi et al., 2011).

Dados mais concretos revelam que a intensidade da radiação na exosfera é cerca de 1367 W/m^2 , sendo que parte desta é absorvida e outra refletida, resultando numa intensidade que está em média perto dos 1000 W/m^2 junto à superfície terrestre (Lebena & Costa, 2007).

No que diz respeito à realidade Portuguesa, a utilização da energia solar ainda faz mais sentido, Portugal situa-se a melhor Latitude da Europa, relativamente á radiação global por metro quadrado e à respetiva produção de energia. Contudo a Latitude não é a única variável responsável pelo aumento ou diminuição da radiação, existem três fatores determinantes na variação da quantidade de radiação que chega á terra (EC, 2012):

1. **Geometria da terra**, latitude e o anglo do Sol;
2. **Terreno**, Inclinação da terra (neste caso de estudo isso pode ser ajustado inclinando o painel ou coletor solar), sombras e elevação do terreno.
3. **Condições atmosféricas:**
 - 3.1. Gases (partículas de ar, ozono, CO_2 e O_2)
 - 3.2. Partículas líquidas e solidas (aerossóis)
 - 3.3. Nuvens (água condensada)

Em Portugal, a sul do País a radiação é ligeiramente maior, tornando a região do Algarve a mais apropriada para a produção de energia proveniente do sol. Uma análise simples da figura abaixo apresentada, demonstra que este tipo de energia deve ser cada vez mais explorado em Portugal, pois as potencialidades apresentadas são extraordinárias.

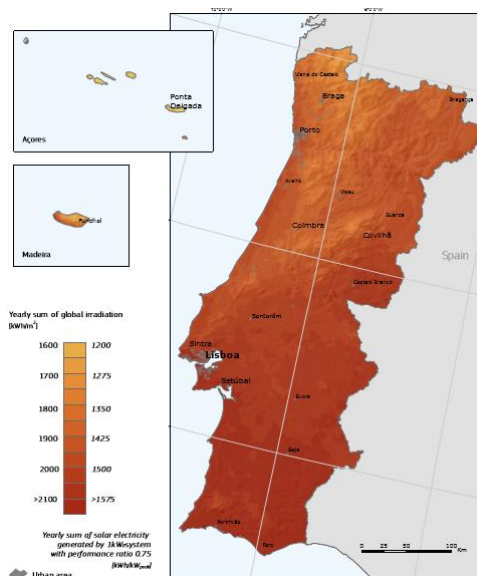


Figura 2.3 - Radiação global em Portugal

Fonte: Hold & Pinedo-Pascua, 2012

2.4.1 Coletor solar

Os coletores solares são uma das formas de aproveitamento da radiação para poupança de energia. Idealmente estes devem ser inclinados de forma a obter um maior rendimento dos mesmos, na região do Algarve essa inclinação ideal ronda os 32°, garantindo assim boas eficiências em ambas as estações, entenda-se, Verão e Inverno (Rocha, 2015). Na implementação de um sistema de coletores solares para aproveitamento de energia solar deve ser considerado o tipo de ligação entre cada coletor, a tabela seguinte resume os tipos de ligações existentes e as vantagens e desvantagens de cada.

Tabela 2.8- Tipos de ligações em coletores solares

Tipos de ligação	Vantagens	Desvantagens
<p>Ligação Série</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Baixo custo; - Instalação Simples; - Aumento da temperatura de saída 	<ul style="list-style-type: none"> - Número de coletores limitado; - Menor rendimento e maior perda de carga com aumento do nº de coletores.
<p>Ligação Paralelo</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Permite instalação de um maior número de coletores; - Maior rendimento. 	<ul style="list-style-type: none"> - Custo Elevado; - Instalação complexa.
<p>Ligação Paralelo de canais</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Baixo custo; - Instalação Simples; - Maior rendimento. 	<ul style="list-style-type: none"> - Capacidade máxima para 4 coletores.

Fonte: Rocha, 2015

Para o estudo em desenvolvimento, o tipo de coletor solar utilizado baseia-se no uso de tubos a vácuo. Este tipo de tecnologia é geralmente mais eficiente a alta temperatura do que os sistemas de coletores planos convencionais. Para além disso, como os tubos a vácuos contêm um absorvedor, a temperatura do tubo no seu interior pode atingir altas temperaturas enquanto o vidro exterior continua com uma temperatura baixa, permitindo uma melhor performance no Inverno, em que a temperatura exterior se encontra baixa. O funcionamento do coletor de tubos a vácuo baseia-se na absorção da energia solar por parte do vidro exterior do tubo a vácuo, onde a energia é convertida em calor, sendo esse calor transferido para o fluido que circula pelo absorvedor.

O coletor (Figura 2.4) é constituído por linhas de tubos de vidro transparentes em paralelo, contendo cada um deles um absorvedor (Alghoul et al., 2005)

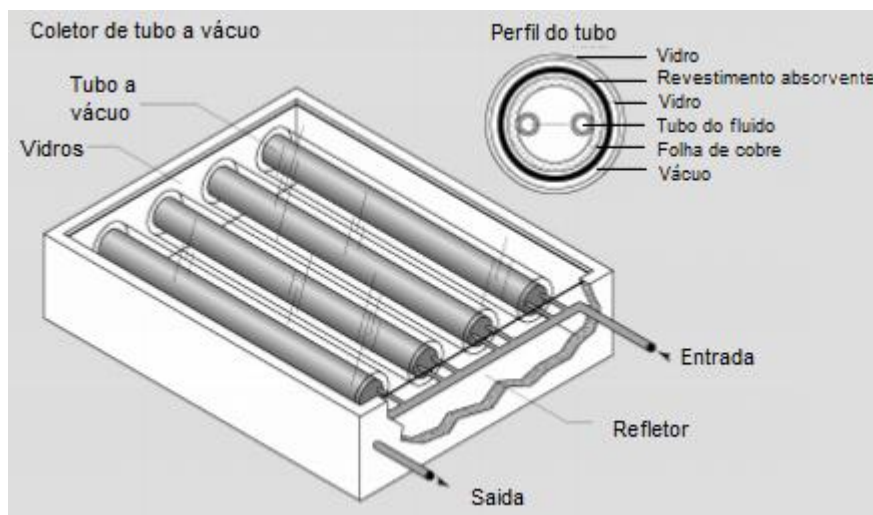


Figura 2.4 - Coletor solar com tubos a vácuo

Fonte: Adaptado de Alghoul et al., 2005

2.4.2 Células fotovoltaicas

O sistema de funcionamento das células fotovoltaicas baseia-se na conversão direta da energia solar em energia elétrica. A composição destas células pode variar relativamente ao tipo de material que as constituem (Al-Alili, 2012). A transformação da energia solar em energia fotovoltaica foi descoberta em 1839 por *Edmond Becquerel*, que descreveu o processo como efeito fotovoltaico (Hwang et al., 2008). Mais especificamente, o processo pode ser desenvolvido de duas formas, através de corrente direta ou de corrente alternada, a utilização de Corrente Alternada (AC) é preferível por trazer vantagens económicas, no sentido em que

possibilita ligar á rede sem necessidade de recorrer a bateria. O funcionamento das células fotovoltaicas (Figura 2.5) baseia-se no efeito fotovoltaico, este pode ser definido como a criação de uma tensão elétrica num determinado material quando exposto a radiação solar (Diffat & Abu-Zour, 2007).

Tecnologia		Eficiência (%)
Silício	Monocristalino	25,0 ± 0,5
	Policristalino	20,4 ± 0,5
	Filmes finos transferidos ⁴	20,1 ± 0,4
Compostos III A-VA (ou 13-15)	GaAs (filme fino)	28,8 ± 0,9
	GaAs (policristalino)	18,4 ± 0,5
	InP (monocristalino)	22,1 ± 0,7
Calcogênios Compostos II B-VI A (ou 12-16)	CIGS (CuIn _x Ga _(1-x) Se ₂) (filme fino)	19,6 ± 0,6
	CdTe (filme fino)	18,3 ± 0,5
Silício amorfo / nanocristalino	Amorfo (a-Si) (filme fino)	10,1 ± 0,3
	Nanocristalino (nc-Si)	10,1 ± 0,2
Células Sensibilizadas por Corantes (DSSC)		11,9 ± 0,4
Células Orgânicas (filme fino)		10,7 ± 0,3
Multijunção	InGaP/GaAs/InGaAs	37,7± 1,2
	a-Si/nc-Si/nc-Si (filme fino)	13,4± 0,4

Figura 2.5 - Tecnologias de células fotovoltaicas

Fonte: Pinho & Galdino, 2014

As tecnologias de silício são as com maior representação no mercado, cerca de 85%, isto porque são as que oferecem maior confiança e eficiência ao consumidor. O módulo fotovoltaico policristalino(p-SI), tem uma eficiência menor em relação ao monocristalino(m-SI), isto porque o o p-SI tem um processamento mais simples, embora o material seja o mesmo, o facto de o p-SI ser uma junção de cristais ao invés de ser apenas um grande cristal como no m-SI, traduz-se numa redução da pureza cristalina da tecnologia (Ruther, 2004). Consequentemente a eficiência do p-SI é menor, bem como o seu custo de produção.

2.5 Processos de arrefecimento

O processo de arrefecimento de um edifício pode ser concretizado de diversas formas, a figura 2.6 revela as tecnologias que são conhecidas neste momento.

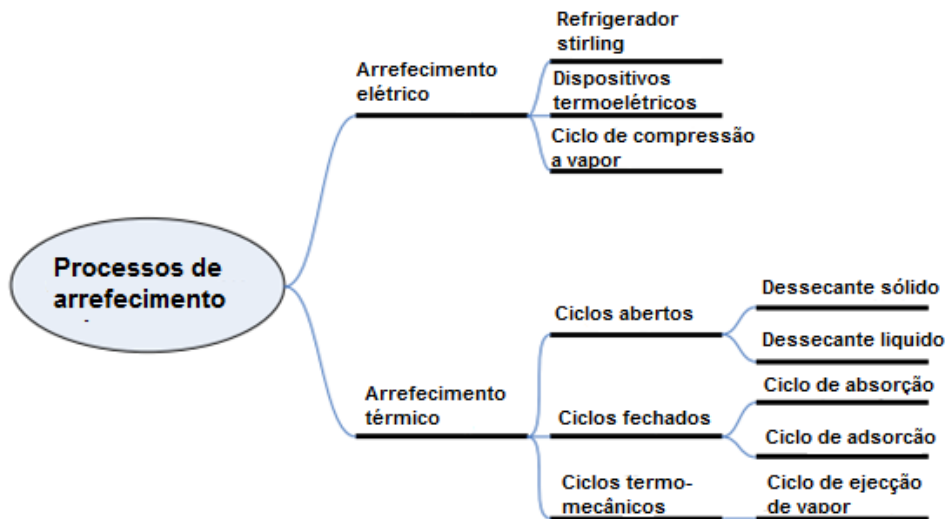


Figura 2.6 - Sistemas de arrefecimento elétricos e solares (térmicos).

Fonte: Adaptado de Al-Alili, 2012

Neste estudo para arrefecimento serão utilizados o ciclo de absorção e o ciclo de compressão a vapor, tendo estes por base a energia solar e a energia elétrica, respetivamente.

- **Ciclo de absorção**

O ciclo de absorção (Figura 2.7) incide na utilização de coletor solar, um armazenador do fluido quente, um aquecedor auxiliar, um evaporador e um compressor térmico. O processo inicia-se no absorvedor onde o refrigerante proveniente do refrigerador é absorvido e forma uma mistura rica. Como o processo é exotérmico o calor latente resultante é libertado para o ambiente de forma a manter uma baixa temperatura e pressão no absorvedor. De seguida a bomba faz circular a solução do absorvedor até ao gerador, zona de alta pressão, onde o calor proveniente do coletor solar é adicionado ao gerador permitindo separar o líquido refrigerante do líquido de absorção, sendo o último reencaminhado para o absorvedor passando por uma válvula de alívio de pressão. O líquido refrigerante segue para condensação, no condensador, passando posteriormente pela válvula de expansão e saindo para em direção ao evaporador, onde é evaporado e causa o processo de arrefecimento. O vapor do refrigerante é absorvido novamente no absorvedor dando novamente início ao ciclo (Hassan & Mohamad, 2012).

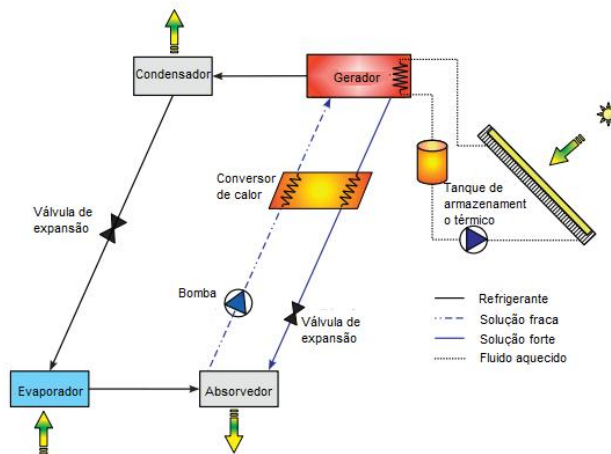


Figura 2.7 - Funcionamento do ciclo de absorção

Fonte: Hassan & Mohamad, 2012

- **Ciclo de compressão a vapor**

O ciclo de compressão a vapor consiste na utilização de um compressor, uma válvula de expansão e dois permutadores de calor. A figura abaixo ilustra o funcionamento do ciclo.

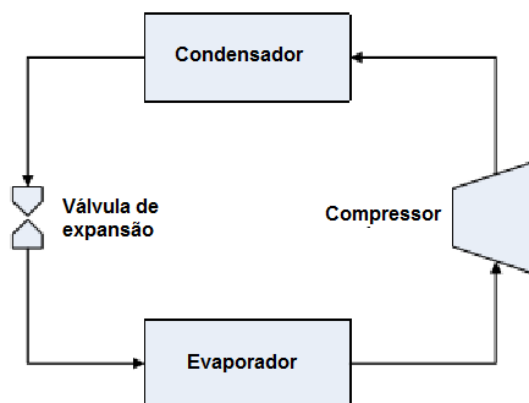


Figura 2.8 - Funcionamento do ciclo de compressão a vapor.

Fonte: Adaptado de Al-Alili, 2012

O sistema baseia-se na condensação e ebulição de um fluido a diferentes pressões e temperaturas. Este permite refrigerar através da transferência de calor do interior do espaço para o fluido que se encontra a baixa pressão e temperatura, que por sua vez, devido ao aumento de temperatura entra em ebulição no evaporador. O vapor resultante é de seguida levado para o compressor, onde é comprimido voltando ao estado líquido. Para terminar o ciclo, o fluido sofre uma diminuição de pressão na válvula de expansão, como este processo é adiabático, a temperatura diminui e parte do fluido evapora para o exterior de modo a permitir a remoção da energia do processo (Al-Alili, 2012).

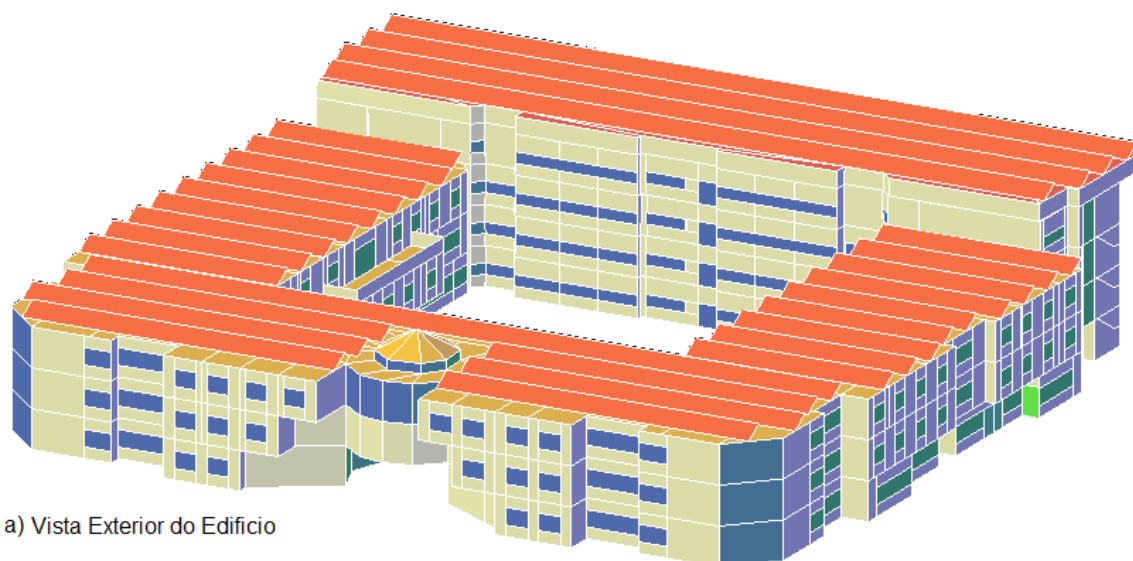
3 Apresentação do Caso de Estudo

O estudo realizou-se na Universidade do Algarve, mais propriamente no Campus Gambelas, tendo como referência o edifício da Faculdade de Ciências e tecnologias (FCT) e o novo edifício construído para albergar cursos de Medicina. Para uma localização mais precisa, o ponto mais a sudeste de cada edifício conta com as coordenadas Latitude N37.044573 e Longitude W-7.971095 relativo ao edifício FCT e N37.045014 e W-7.970908 para o edifício de Medicina. O edifício estudado engloba o edifício da FCT (faculdade de ciências e tecnologias) e o novo edifício de medicina (figura 3.9).

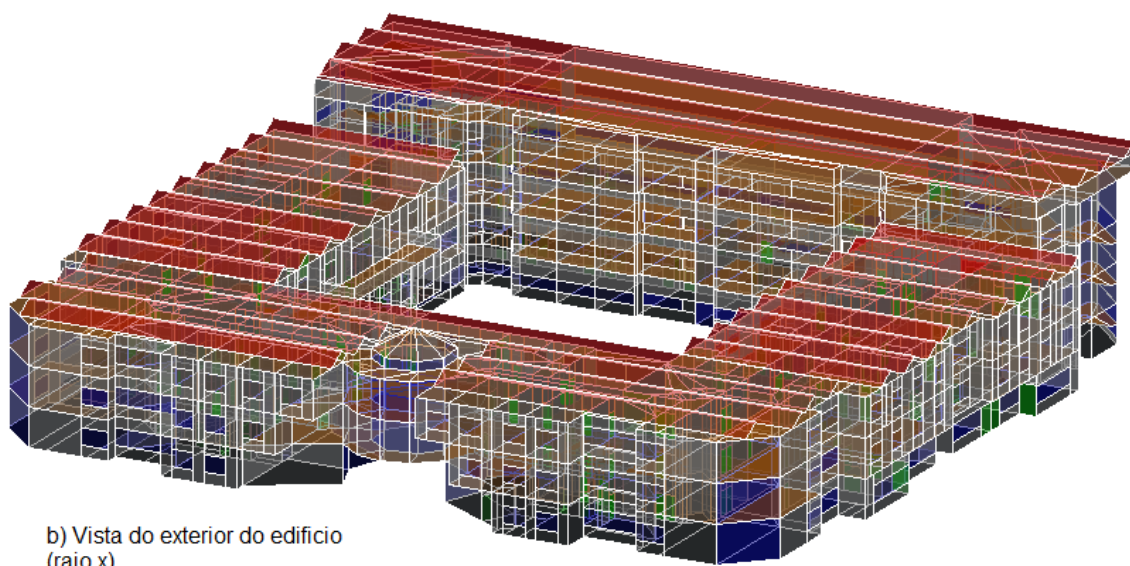


Figura 3.9 - Orientação do edifício

A figura seguinte ilustra o edifício em estudo numa percetiva em 3D, de forma a perceber-se a estrutura do mesmo.



a) Vista Exterior do Edifício



b) Vista do exterior do edifício
(raio x)

Figura 3.10 - Vista exterior dos edifícios FCT e Medicina; a) vista compacta b)vista raio x

Com a figura 3.10 consegue-se perceber a estrutura do edifício utilizado no estudo. De forma a entender-se melhor a composição dos 319 compartimentos analisados as figuras seguinte demonstram o interior de cada piso.

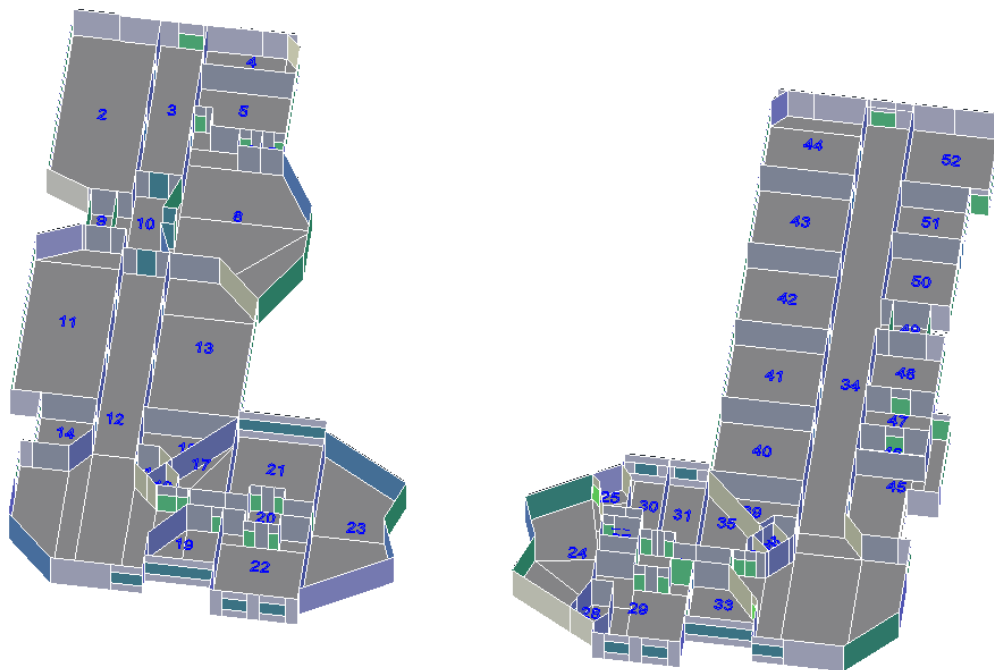


Figura 3.11 - Piso 1 FCT

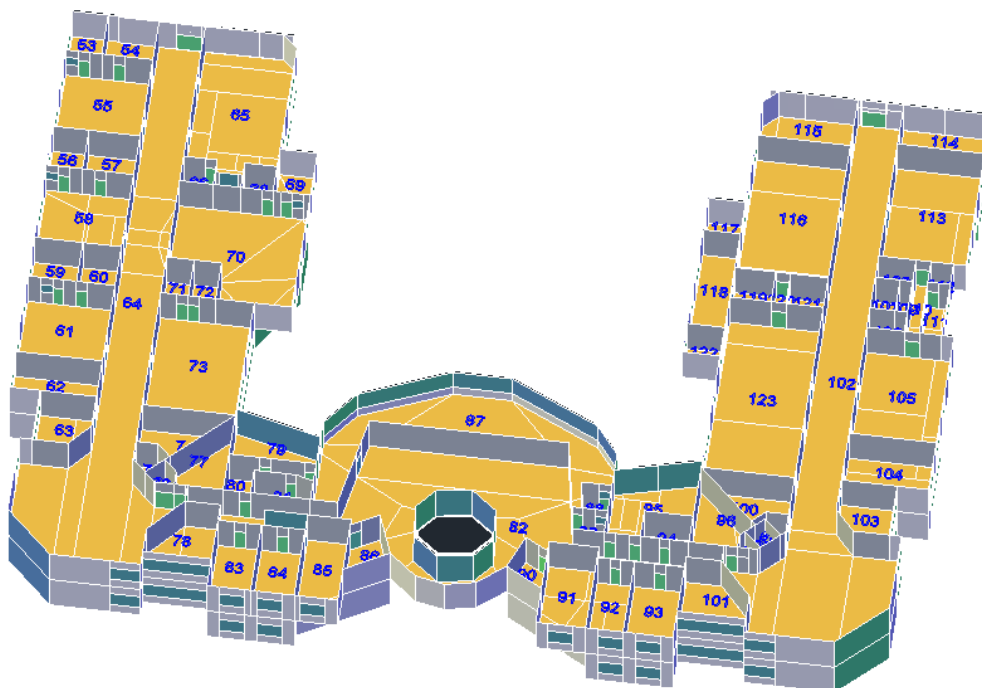


Figura 3.12 - Piso 2 FCT

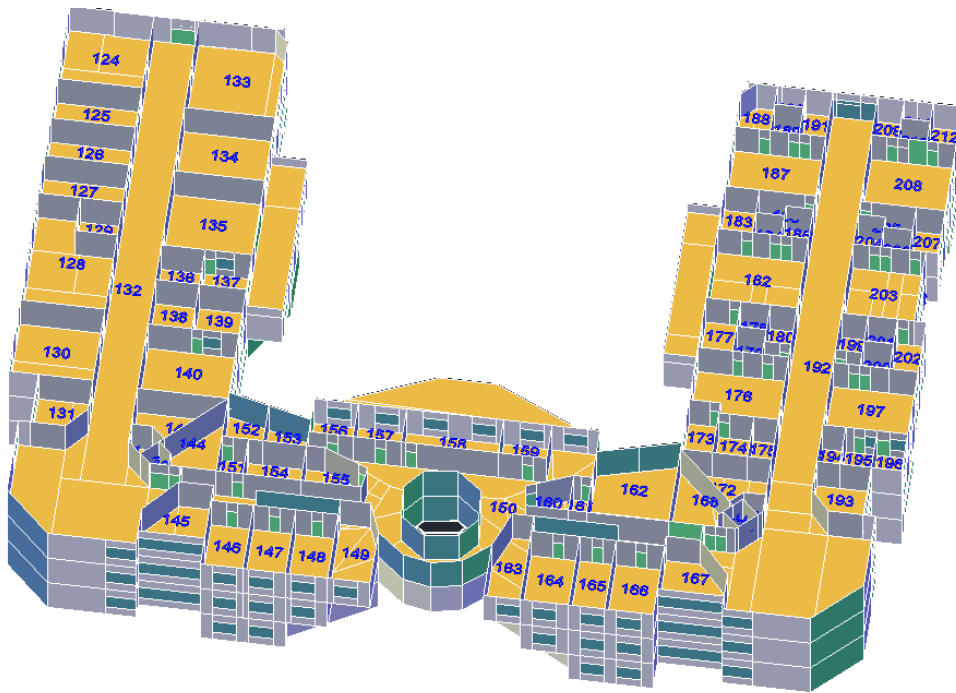


Figura 3.13 - Piso 3 FCT

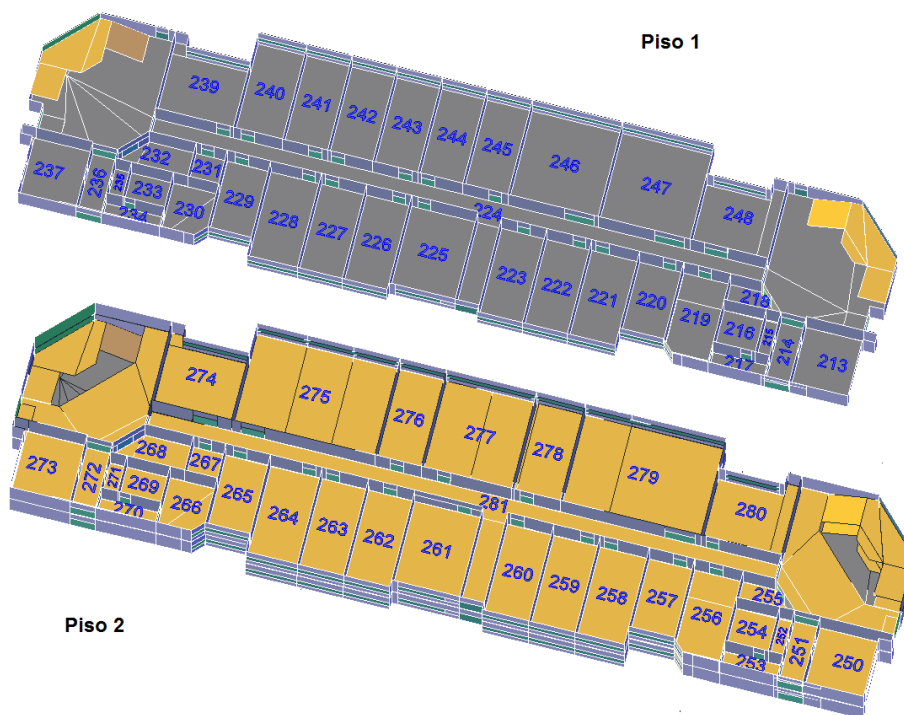


Figura 3.14 - Pisos 1 e 2 Medicina

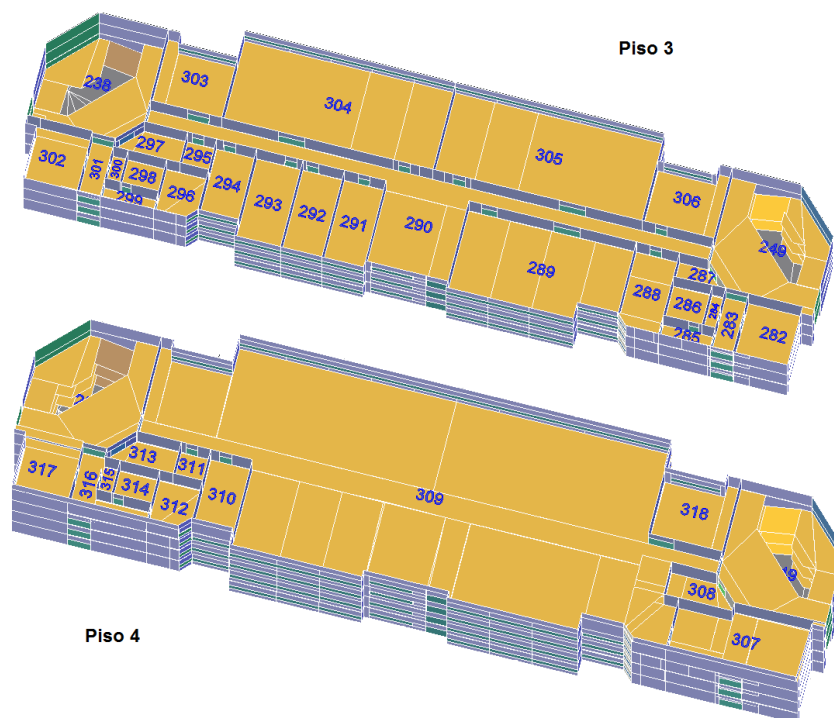


Figura 3.15 - Piso 3 e 4 Medicina

A legenda correspondente ao número dos compartimentos apresentados nas figuras 3.3, 3.4, 3.5 e 3.6 pode ser encontrada na tabela 3.10. Como se pode verificar nas figuras acima, o edifício está dividido em compartimentos, cada um com a sua função. Estes devem ser definidos para que no estudo seja realizada uma análise tendo em consideração os diferentes usos dados a cada compartimento. Isto porque muitos destes compartimentos não são utilizados permanentemente, não havendo assim a necessidade de os climatizar da mesma forma de outros as tabelas 3.9 e 3.10

Tabela 3.9 - Número de compartimentos em cada um dos edifícios

<u>Compartimentos</u>	<u>FCT</u>	<u>MED</u>	<u>FCT+MED</u>
Apoio ao Laboratório	52	2	54
Área de passagem	20	18	38
Arrecadação	23	4	27
Bar	1	0	1
Cozinha Bar	3	0	3
Elevador	6	7	13
Gabinete	60	40	100
Laboratório	26	7	33
Laboratório Grande	0	4	4
Sala de aula/estudo/seminários	3	3	6
Secretaria	6	0	6
WC	12	21	33
Total	212	106	318

Tabela 3.10 - Descrição completa dos compartimentos estudados.

Comp. Subterrâneo	1	Gabinete	41	Arrecadação	81	Apoio Laboratório	121	Arrecadação	161	Apoio Laboratório	201	Gabinete	241	Área de passagem	281
Gabinete	2	Gabinete	42	Área de passagem	82	Apoio Laboratório	122	Gabinete	162	Apoio Laboratório	202	Gabinete	242	Gabinete	282
Área de passagem	3	Laboratório	43	Gabinete	83	Laboratório	123	Gabinete	163	Laboratório	203	Gabinete	243	Área de passagem	283
Gabinete	4	Laboratório	44	Gabinete	84	Gabinete	124	Gabinete	164	Apoio Laboratório	204	Gabinete	244	WC	284
Cozinha Bar	5	Gabinete	45	Gabinete	85	Gabinete	125	Gabinete	165	Apoio Laboratório	205	Gabinete	245	Área de passagem	285
Cozinha Bar	6	Gabinete	46	Arrecadação	86	Gabinete	126	Gabinete	166	Apoio Laboratório	206	Gabinete	246	WC	286
Cozinha Bar	7	Gabinete	47	Sala de Estudo	87	Gabinete	127	Gabinete	167	Apoio Laboratório	207	Gabinete	247	elevador	287
Bar	8	Gabinete	48	Arrecadação	88	Laboratório	128	WC	168	Laboratório	208	Gabinete	248	WC	288
Área de passagem	9	Área de passagem	49	Arrecadação	89	Apoio Laboratório	129	Arrecadação	169	Apoio Laboratório	209	escadas	249	Laboratório Grande	289
Área de passagem	10	Gabinete	50	Arrecadação	90	Laboratório	130	Elevador	170	Apoio Laboratório	210	Gabinete	250	Área de passagem	290
Sala de Aula	11	Laboratório	51	Gabinete	91	Gabinete	131	Arrecadação	171	Apoio Laboratório	211	Área de passagem	251	Laboratório pequeno	291
Área de passagem	12	Laboratório	52	Gabinete	92	Área de passagem	132	WC	172	Gabinete	212	WC	252	Laboratório	292
Gabinete	13	Gabinete	53	Gabinete	93	Sala de Aula	133	Apoio Laboratório	173	Gabinete	213	Área de passagem	253	Laboratório	293
Arrecadação	14	Apoio Laboratório	54	Arrecadação	94	Sala de Aula	134	Apoio Laboratório	174	Área de passagem	214	WC	254	Laboratório	294
WC	15	Laboratório	55	Sala Seminários	95	Laboratório	135	Apoio Laboratório	175	WC	215	elevador	255	sala maquinas	295
Arrecadação	16	Gabinete	56	WC	96	Apoio Laboratório	136	Laboratório	176	WC	216	WC	256	WC	296
WC	17	Apoio Laboratório	57	Arrecadação	97	Apoio Laboratório	137	Gabinete	177	Área de passagem	217	Gabinete	257	elevador	297
Arrecadação	18	Laboratório	58	Elevador	98	Apoio Laboratório	138	Apoio Laboratório	178	elevador	218	Gabinete	258	WC	298
Gabinete	19	Gabinete	59	Arrecadação	99	Gabinete	139	Apoio Laboratório	179	WC	219	Gabinete	259	Área de passagem	299
Área de passagem	20	Apoio Laboratório	60	WC	100	Laboratório	140	Apoio Laboratório	180	Gabinete	220	Gabinete	260	WC	300
Gabinete	21	Laboratório	61	Gabinete	101	WC	141	Apoio Laboratório	181	Gabinete	221	Gabinete	261	Área de passagem	301
Gabinete	22	Gabinete	62	Área de passagem	102	Arrecadação	142	Laboratório	182	Gabinete	222	Gabinete	262	Gabinete	302
Área de passagem	23	Gabinete	63	Gabinete	103	Arrecadação	143	Gabinete	183	Gabinete	223	Gabinete	263	Laboratório	303
Área de passagem	24	Área de passagem	64	Laboratório	104	WC	144	Apoio Laboratório	184	Área de passagem	224	Gabinete	264	Laboratório Grande	304
Secretaria	25	Laboratório	65	Laboratório	105	Gabinete	145	Apoio Laboratório	185	Gabinete	225	Gabinete	265	Laboratório Grande	305
Arrecadação	26	Apoio Laboratório	66	Apoio Laboratório	106	Gabinete	146	Apoio Laboratório	186	Gabinete	226	WC	266	Laboratório	306
Arrecadação	27	Apoio Laboratório	67	Apoio Laboratório	107	Gabinete	147	Laboratório	187	Gabinete	227	sala maquinas	267	Laboratório	307
Secretaria	28	Apoio Laboratório	68	Apoio Laboratório	108	Gabinete	148	Gabinete	188	Gabinete	228	elevador	268	Laboratório pequeno	308
Secretaria	29	Apoio Laboratório	69	Apoio Laboratório	109	Gabinete	149	Apoio Laboratório	189	Gabinete	229	WC	269	Laboratório Grande	309
Secretaria	30	Laboratório	70	Área de passagem	110	Área de passagem	150	Apoio Laboratório	190	WC	230	Área de passagem	270	Gabinete	310
Secretaria	31	Apoio Laboratório	71	Apoio Laboratório	111	Área de passagem	151	Apoio Laboratório	191	sala maquinas	231	WC	271	sala maquinas	311
Área de passagem	32	Apoio Laboratório	72	Apoio Laboratório	112	Gabinete	152	Área de passagem	192	elevador	232	Área de passagem	272	WC	312
Secretaria	33	Laboratório	73	Laboratório	113	Gabinete	153	Gabinete	193	WC	233	Gabinete	273	elevador	313
Área de passagem	34	WC	74	Gabinete	114	Gabinete	154	Apoio Laboratório	194	Área de passagem	234	Gabinete	274	WC	314
WC	35	Arrecadação	75	Gabinete	115	Gabinete	155	Apoio Laboratório	195	WC	235	Sala de Aula	275	Área de passagem	315
Arrecadação	36	Arrecadação	76	Laboratório	116	Gabinete	156	Apoio Laboratório	196	Área de passagem	236	Gabinete	276	WC	316
Elevador	37	WC	77	Apoio Laboratório	117	Gabinete	157	Laboratório	197	Gabinete	237	Sala de Aula	277	Gabinete	317
Arrecadação	38	Gabinete	78	Apoio Laboratório	118	Gabinete	158	Apoio Laboratório	198	escadas	238	Gabinete	278	Laboratório	318
WC	39	Gabinete	79	Apoio Laboratório	119	Gabinete	159	Apoio Laboratório	199	Gabinete	239	Sala de Aula	279	telhado	319
Laboratório	40	Área de passagem	80	Área de passagem	120	Arrecadação	160	Apoio Laboratório	200	Gabinete	240	Gabinete	280		

4 Metodologia

Pretende-se neste caso de estudo, explorar o software desenvolvido em Conceição (2003), Conceição & Lucio (2008), Conceição & Lucio (2006), de forma a alcançar o melhor conforto térmico, qualidade do ar e consumo energético para o edifício FCT e Medicina da Universidade do Algarve. O modelo calcula em condições transientes e é baseado em equações integrais do balanço de energia e massa (ver Conceição & Lucio, 2010). Na resolução do sistema de equações é utilizado o método de Runge-Kutta Fehlberg com controlo do erro. Com as equações desenvolvidas, o modelo numérico fornece dados representativos do interior e do exterior do edifício. O programa foi validado para as condições de inverno e para as condições de verão em Conceição e Lúcio (2006). Para que os dados fornecidos pelo modelo numérico sejam o mais realistas possível, devem ser estipuladas as condições iniciais. A tabela 4.11 ilustra os valores iniciais considerados.

Tabela 4.11 - Dados de entrada

Dados	Parâmetros	Verão	Inverno
Geográficos	Dia	22/6	22/12
	Latitude [°]	Faro : 39	
Ambientais	Ângulo de incidência do vento [°]	96	39
	Concentração de CO ₂ [kg/m ³]	0.0005	
Ocupantes	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	
	C _{p 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 compartimento subterrâneo (m ³)	15000	
	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

Para a analisar a possibilidade de se alcançar a sustentabilidade energética no edifício, o desenvolvimento do estudo realizou-se pela seguinte ordem:

- **1ª Fase: Estruturação do edifício:** onde se definiu a estrutura do edifício bem como os locais de colocação dos coletores solares e células fotovoltaicas.
- **2ª Fase: Definição das Condições Interiores:** onde se definiu a ocupação de cada compartimento, bem como o caudal de ventilação necessário para limitar o aumento do CO₂.
- **3ª Fase: Implementação das ventilações:** nesta fase elaboraram-se vários tipos de ventilação e compararam-se para se perceber qual deles obtinha melhores resultados nos parâmetros relevantes para a qualidade do ar e conforto térmico.
- **4ª Fase: Implementação de Sistemas AVAC:** Nesta fase introduziram-se dois tipos de sistemas AVAC para cada estação (Verão e Inverno), onde um funciona com a energia proveniente dos coletores solares, e outro com energia elétrica.
- **5ª Fase: Análise de consumos:** Nesta fase pretende-se comparar os consumos energéticos dos sistemas de AVAC estudados bem como analisar os gastos relativos à iluminação do edifício.

4.1 1ª Fase – Estrutura do edifício:

A primeira fase do estudo incidiu na definição das estruturas do edifício. Em primeiro lugar desenharam-se todas as estruturas do edifício como demonstra a figura 3.10, atrás apresentada, para a concretização do desenho em *Computer-Aided Design* (CAD) utilizaram-se as plantas dos edifícios, juntamente com algumas medições feitas no terreno.

Definida a projeção em 3D dos dois edifícios em estudo, procedeu-se à nomeação das superfícies, para cada uma das superfícies desenhadas foi definida a sua utilidade (Janelas, portas, placas, paredes, chão, coletores, escadas e tetos)

Os coletores solares utilizados no estudo funcionam com o sistema de tubos a vácuo. Na sua implementação considerou-se que estes deviam ser colocados virados para sul, com uma inclinação de 32° em relação à horizontal (figura 4.16), esta inclinação permite uma

maior rentabilização da radiação solar incidente tendo em consideração as coordenadas geográficas da região. Para a definição da disposição dos coletores calculou-se a distância mínima a que estes devem ser colocados, evitando sombreamentos nos momentos de maior radiação solar.

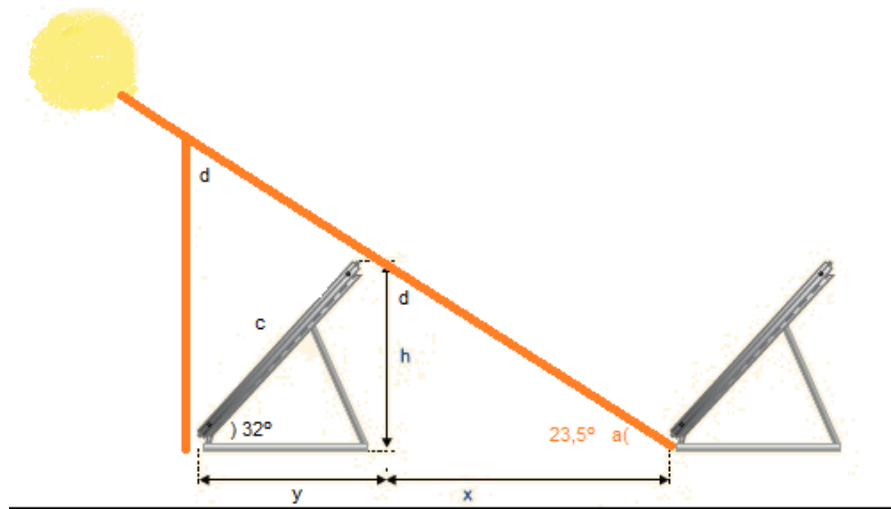


Figura 4.16 - Esquema exemplar da implementação dos coletores.

No solstício de inverno em Portugal a inclinação do sol às 12h é de 23.5°, como este se trata do dia em que a inclinação do sol é menor, a distância calculada para este valor será válida para todo o ano. Assim, calculou-se a distância mínima entre coletores (figura 4.16):

$$\text{sen } 32 = \frac{h}{c} \leftrightarrow \text{sen } 32 = \frac{h}{2} \leftrightarrow h = 1,06m$$

$$\tan a = \frac{h}{x} \leftrightarrow \tan 23,5 = \frac{1,06}{x} \leftrightarrow x = 2,44m$$

Onde:

c = 2 metros, tamanho dos coletores.

Através dos cálculos efetuados obteve-se a disposição dos coletores apresentados na figura 4.17, a área de cada um deles é apresentada na tabela seguinte.

Tabela 4.12 - Coletores implementados

Serie de Coletores	Área (m ²)	Serie de Coletor	Área (m ²)
1	32,0	16	59,9
2	36,7	17	36,7
3	36,7	18	36,7
4	36,7	19	36,7
5	34,6	20	36,7
6	34,6	21	36,7
7	36,7	22	36,7
8	36,7	23	36,7
9	36,7	24	36,7
10	138,6	25	34,3
11	59,9	26	133,4
12	62,0	27	137,8
13	57,7	28	137,8
14	57,7	29	137,8
15	62,0	Total	1693,4

Em termos práticos cada uma das 29 series tem mais que um coletor, consoante a área. Após a implementação dos coletores solares procedeu-se à implementação das células fotovoltaicas de silício policristalino. Na escolha dos locais ideais para a colocação das células fotovoltaicas, teve-se em consideração a área disponível, de forma a evitar a dispersão de células ao longo do edifício, preferiu-se a colocação das mesmas nas áreas mais extensas viradas a Sul. A figura 4.17 demonstra os locais de colocação das células fotovoltaicas e dos coletores solares.

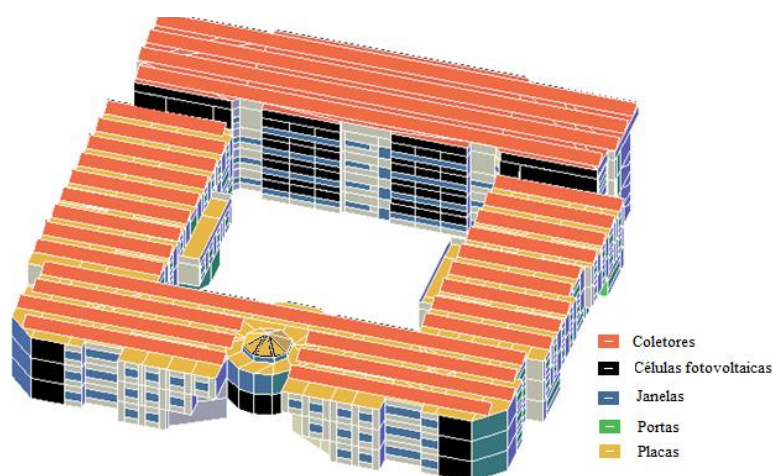


Figura 4.17 - Edifício com coletores e células

A área das células fotovoltaicas implementada é de 542 m².

4.2 2ª Fase – Caracterização interior do edifício

Nesta segunda fase pretende-se analisar as condições no interior do edifício, nesse sentido devem ser caracterizados todos os espaços do edifício, isto é, deve ser fornecido ao modelo numérico uma listagem da ocupação de cada compartimento, a ventilação e a utilização de AVAC que se pretende ao longo do dia.

4.2.1 Ocupação

Especificou-se o tipo de uso dado a cada compartimento (tabela 4.13), como já foi referido, muitos dos compartimentos do edifício não são ocupados permanentemente, assim definiu-se uma ocupação consoante o tipo de utilização. Essa ocupação varia ao longo do dia, isto porque há momentos em que quase todos os compartimentos estão desocupados, como por exemplo horas de almoço. As tabelas 4.13 e 4.14 demonstram a ocupação máxima e a ocupação ao longo do dia respetivamente.

Tabela 4.13 - Ocupação máxima de cada compartimento (nº de ocupantes)

Compartimento	Ocupação máxima
Apoio ao Laboratório	0
Área de passagem	0
Arrecadação	0
Bar	20
Cozinha Bar	0
Elevador	0
Gabinete	2
Laboratório	3
Laboratório Grande	15
Sala de aula	15
Secretaria	2
WC	0

Tabela 4.14 - Ocupação do edifício ao longo do dia por compartimento

Compartimento	08:30	10:00	10:15	11:45	12:00	13:30	13:45	15:15	15:30	17:00	17:15	18:45	19:00	20:30	24 00
Gabinete	0	2	0	2	2	0	0	2	0	2	2	0	0	0	0
Bar	0	5	10	5	10	15	15	5	10	5	5	0	0	0	0
Sala de Aula	0	15	0	15	0	15	0	15	0	15	0	15	0	0	0
Secretaria	0	2	0	2	1	0	0	2	0	2	0	0	0	0	0
Laboratório	0	3	2	3	3	0	0	3	2	3	3	3	0	0	0
Laboratório Grande	0	15	2	15	15	0	0	15	2	15	2	15	0	0	0

A tabela 4.14 ilustra a informação introduzida no *software* para representar a ocupação do edifício. Os compartimentos ocupados funcionam dentro dos seguintes padrões:

- **Gabinetes e secretaria:** funcionam num sistema de 3 intervalos, (10:00 às 10:15; 12:00 às 13:45; 15:15 às 15:30). Terminando a ocupação às 17:00 ou 17:15;
- **Laboratórios e Laboratórios (aulas):** tem apenas um intervalo para almoço (12:00-13:45). Terminando a ocupação às 18:45. No entanto os laboratórios com aulas sofrem um aumento de ocupação nos períodos de aulas
- **Salas de Aula:** estes espaços estão ocupados apenas nos momentos em que há aulas (8:30 às 10:00; 10:15 às 11:45; 12:00 às 13:30; 13:45 às 15:15; 15:30 às 17:00 e das 17:15 às 18:45), nos restantes períodos as salas encontram-se desocupadas;
- **Bar:** o sistema de ocupação do bar funciona ao contrário dos restantes, nos momentos de intervalo e de hora de almoço este atinge os seus picos máximos de ocupação.

4.2.2 AVAC

Para além do ficheiro apresentado na tabela 4.14, criou-se outro, como objetivo fornecer informação ao modelo numérico dos momentos em que é necessária a utilização de AVAC (sistemas que serão implementados na 4ªFase-Implementação de sistemas AVAC), isto é, momentos em que o compartimento se encontra ocupado.

Tabela 4.15 - Imagem do ficheiro criado para representar a utilização de AVAC do edifício

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
1																	
2	Compartimento		8,5	10	10,25	11,75	12	13,5	13,75	15,25	15,5	17	17,25	18,75	19	20,5	24
3	Terra	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	Gabinete	2	0	1	0	1	1	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0
5	Área de passagem 1	3	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
6	Gabinete	4	0	1	0	1	1	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0
7	Cozinha Bar	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	Cozinha Bar	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	Cozinha Bar	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	Bar	8	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
11	Área de passagem 1	9	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
12	Área de passagem	10	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
13	Sala de Aula	11	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0	0
14	Área de passagem	12	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0

4.2.3 Ventilação

Como já foi referido, a existência de pessoas dentro de um espaço fechado resulta no aumento do CO₂ no seu interior. Tendo em consideração a norma da ASHRAE (2003), para espaços diversos com uso de computador a taxa de ventilação requerida é de 10 l/s por pessoa. Para calcular a ventilação necessária ao longo do dia utilizou-se a seguinte equação:

$$Vent(m^3/s) = \frac{n^{pessoas} * taxa\ de\ ventilação\ (L/s)}{1000(L/m^3)} \quad (5)$$

Aplicando a equação aos dados de ocupação existente, tornou-se possível definir o caudal de ventilação nos momentos em que o edifício se encontra ocupado. No entanto, num edifício existe sempre trocas de ar involuntárias com o exterior, seja por meio de janelas, fendas ou portas. Nesse sentido, determinou-se uma taxa de infiltração de 1 renovação/h, o que significa que numa hora deve entrar no compartimento uma quantidade de ar igual ao seu volume.

Como os compartimentos têm volumes diferentes, foi considerado o volume de cada um para a realização da equação, assim:

$$\text{Taxa de infiltração (m}^3/\text{s)} = n^{\circ} \text{renovações /h} * \frac{\text{Volume do compartimento (m}^3\text{)}}{3600(\text{s/h})} \quad (6)$$

Como a equação 6 não considera a ocupação o valor da taxa de infiltração é igual ao longo do dia para cada compartimento. Assim a ventilação para cada momento depende do número de ocupantes (eq 5) e do volume do compartimento (eq 6). A tabela 4.16 ilustra os resultados obtidos da soma das duas equações para alguns compartimentos.

Tabela 4.16 - Ventilação (m³/s) de entrada no edificio

Compartimento		Horas														
O	D	8:30	10:00	10:15	11:45	12:00	13:30	13:45	15:15	15:30	17:00	17:15	18:45	19:00	20:30	24:00
0	54(Apoio Laboratório)	0,015	0,015	0,015	0,015	0,015	0,015	0,015	0,015	0,015	0,015	0,015	0,015	0,015	0,015	0,015
0	10 (Área de passagem)	0,034	0,034	0,034	0,034	0,034	0,034	0,034	0,034	0,034	0,034	0,034	0,034	0,034	0,034	0,034
0	14 (Arrecadação)	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020
0	8 (Bar)	0,125	0,175	0,225	0,175	0,225	0,275	0,275	0,175	0,225	0,175	0,175	0,125	0,125	0,125	0,125
0	7 (Cozinha Bar)	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003
0	4 (Gabinete)	0,027	0,047	0,027	0,047	0,047	0,027	0,027	0,047	0,027	0,047	0,047	0,027	0,027	0,027	0,027
0	306 (Laboratório)	0,033	0,063	0,053	0,063	0,063	0,033	0,033	0,063	0,053	0,063	0,063	0,063	0,033	0,033	0,033
0	11 (Sala de Aula)	0,110	0,260	0,110	0,260	0,110	0,260	0,110	0,260	0,110	0,260	0,110	0,260	0,110	0,110	0,110
0	28 (Secretaria)	0,009	0,029	0,009	0,029	0,019	0,009	0,009	0,029	0,009	0,029	0,009	0,009	0,009	0,009	0,009
0	15 (WC)	0,021	0,021	0,021	0,021	0,021	0,021	0,021	0,021	0,021	0,021	0,021	0,021	0,021	0,021	0,021

Legenda: O= compartimento de origem da ventilação; D=compartimento de destino da ventilação.

Como se verifica na tabela 4.16, a ventilação tem origem em 0 (exterior) e como destino os compartimentos do edifício. Para além disso verifica-se que os compartimentos ocupados, como os gabinetes e laboratórios sofrem alterações na ventilação ao longo do dia, resultado das variações de ocupação (tabela 4.14). Pelo contrário, os compartimentos que se encontram desocupados (WC e arrecadação p.e.) têm a mesma ventilação ao longo do dia, fruto da taxa de infiltração calculada (equação 6).

Para além do ficheiro da ventilação de entrada no edifício, exemplificado na tabela 4.16, criou-se um ficheiro com a ventilação de saída do edifício com os mesmos caudais do primeiro. No entanto, ao contrário do ficheiro de entrada, a origem da ventilação é um compartimento interno e o destino é o exterior. Deste modo é salvaguardado que o caudal de entrada é igual ao de saída do edifício.

Definida a estrutura do edifício (1ª Fase) e a caracterização interna do edifício (2ª Fase), tornou-se possível, através do *software* simular as condições no interior do edifício para o inverno e para o verão. Mais especificamente, o *software* calculou:

- Dióxido de carbono (mg/m^3);
- Velocidade do ar no interior (m/s);
- Temperatura média radiante ($^{\circ}\text{C}$);
- PMV;
- PPD;
- Horas de frio (h);
- Horas de calor (h);
- Temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$);

4.3 3º Fase – Implementação das ventilações

Tendo em consideração os resultados obtidos na 2ª Fase, verificaram-se as necessidades térmicas dos edifícios, percebendo-se quais os compartimentos com carência de um maior conforto térmico. Nesse sentido desenvolveram-se dois tipos de ventilação específicos para melhorar as condições no interior desses compartimentos

4.3.1 Verão (ventilação Subterrânea)

No verão utilizou-se o compartimento subterrâneo (1), de onde se extraiu o ar para os compartimentos com maior temperatura (CQ). Há compartimentos que se encontram mais quentes de manhã (orientados a Este) e outros mais quentes de tarde (orientados a Oeste). Nesse sentido, para rentabilizar a Ventilação Subterrânea (VS) a extração de ar do compartimento 1 será executada tendo em consideração as necessidades ao longo do dia. Dividiu-se o sistema em duas fases:

- Manhã (figura 4.18): Entre as 8 e as 13h o Compartimento Subterrâneo (CS) fornece ar aos CQ virados a Este;

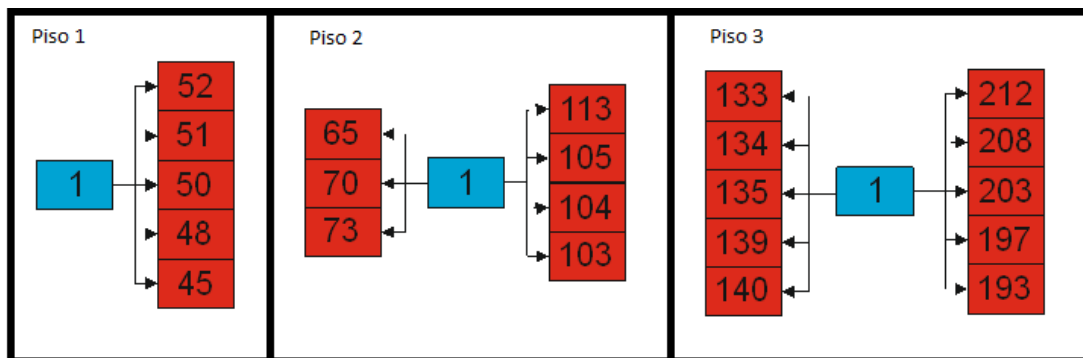


Figura 4.18 - Ventilação subterrânea efetuada de manhã

- Tarde (figura 4.19): Entre as 13 e as 19h o CS fornece ar aos CQ virados a Oeste;

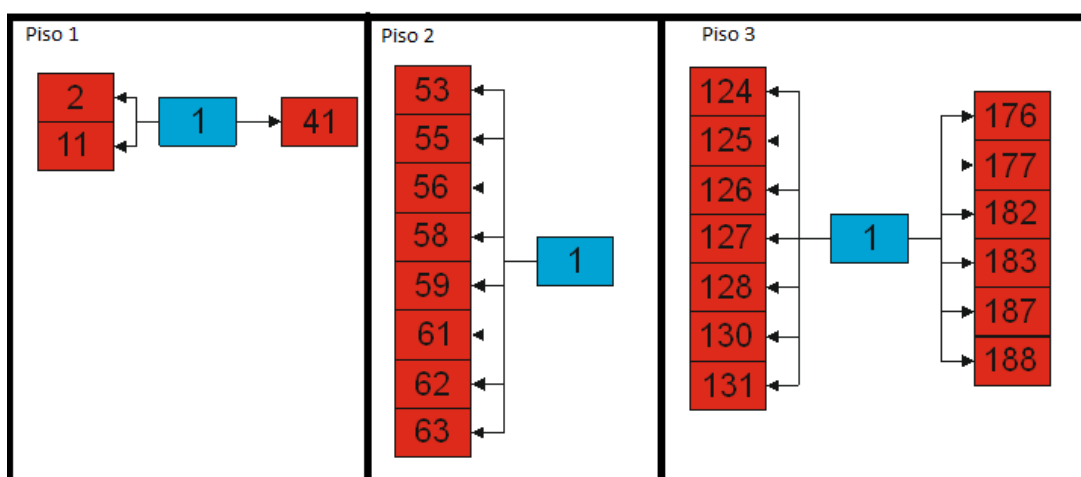


Figura 4.19 - Ventilação Subterrânea efetuada de tarde

Como se verifica nas figuras anteriores, a ventilação subterrânea tem origem no compartimento 1 que por estar subterrado se encontra a 18°C (temperatura definida como temperatura da terra; tabela 4.11), tendo como destino os compartimentos ilustrados nas figuras 4.18 e 4.19. Os restantes compartimentos, que não estão representados continuam com a tipologia de trocas de ar com o exterior (tabela 4.16).

4.3.2 Inverno (ventilação estufas internas)

Relativamente ao sistema de ventilação de inverno, utilizaram-se as áreas de passagem com maior temperatura para servirem de estufas internas. Com base nos dados da simulação inicial (2ª Fase), verificaram-se Compartimentos mais Frios (CF) que serão o destino da ventilação.

- Manhã (figura 4.20): Entre as 8 e as 13h as estufas internas com maior temperatura nesse período (viradas a Este) fornecem ar aos CF virados a Oeste;

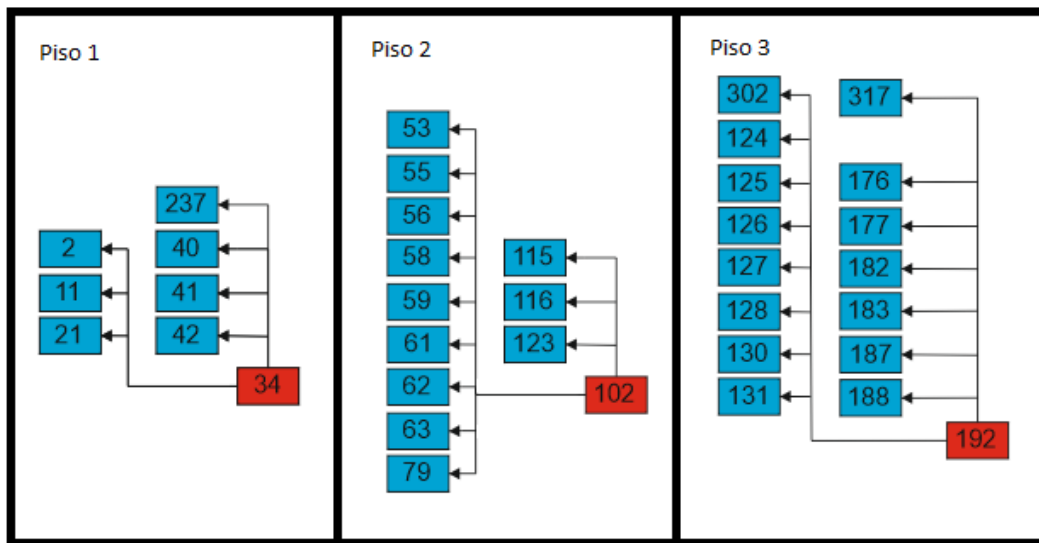


Figura 4.20 - Ventilação Estufas Internas efetuada de manhã

- Tarde (figura 4.21): Entre as 13 e as 19h as estufas internas com maior temperatura nesse período fornecem ar aos CF virados a Este;

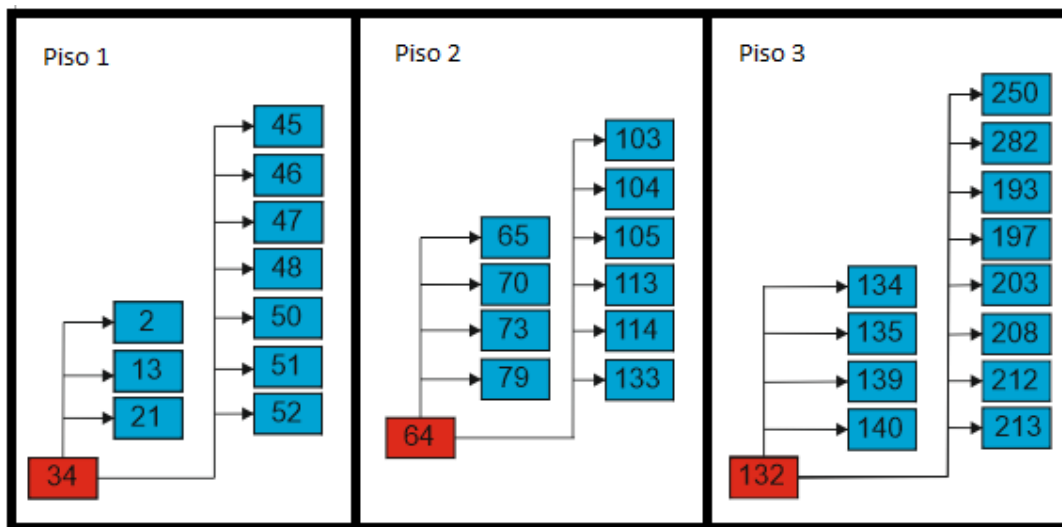


Figura 4.21 - Ventilação Estufas Internas efetuada de tarde

Tal como na VS efetuada no verão, a ventilação de Inverno tem em consideração as necessidades ao longo do dia, em termos ideológicos as duas ventilações funcionam da mesma maneira, a diferença está nos compartimentos intervenientes no processo. No entanto, devido à baixa temperatura verificada na zona norte do edifício, criou-se um sistema que transporta ar quente do compartimento 150 para essa região.

- Entre as 8 e as 19h, a estufa interna (150) fornece ar aos CF virados a Norte (figura 4.22);

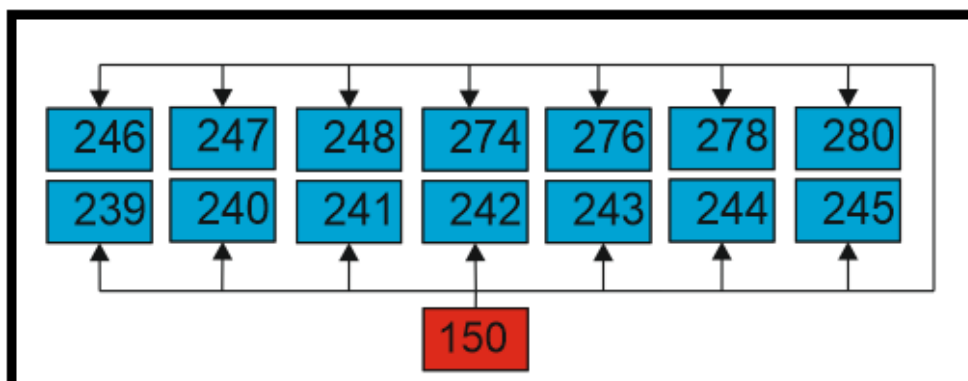


Figura 4.22 - Ventilação estufas internas efetuada durante todo o dia

Para que o *software* reconheça as alterações concebidas nos dois novos sistemas de ventilação criou-se um ficheiro idêntico ao exemplificado na tabela 4.16. Nestes dois sistemas a origem da ventilação varia consoante a necessidade do compartimento. As tabelas seguintes representam os ficheiros criados para o verão (tabela 4.17) e para o inverno (tabela 4.18).

Tabela 4.17 - Exemplos de caudais da VS

Compartimento		Horas														
O	D	8:30	10:00	10:15	11:45	12:00	13:30	13:45	15:15	15:30	17:00	17:15	18:45	19:00	20:30	24:00
0	11	0,110	0,260	0,110	0,260	0,110	0,260	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,110	0,110	0,110
1	11	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,110	0,260	0,110	0,260	0,110	0,260	0,000	0,000	0,000
0	56	0,011	0,031	0,011	0,031	0,031	0,011	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,011	0,011	0,011
1	56	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,011	0,031	0,011	0,031	0,031	0,011	0,000	0,000	0,000
0	73	0,080	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,080	0,110	0,100	0,110	0,110	0,110	0,080	0,080	0,080
1	73	0,000	0,110	0,100	0,110	0,110	0,080	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0	103	0,021	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,021	0,041	0,021	0,041	0,041	0,021	0,021	0,021	0,021
1	103	0,000	0,041	0,021	0,041	0,041	0,021	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

Legenda: O= compartimento de origem da ventilação; D=compartimento de destino da ventilação

Como se verifica na tabela 4.17 os compartimentos de destino da ventilação subterrânea têm o mesmo caudal que na ventilação exterior (tabela 4.16). No entanto, na ventilação subterrânea este caudal é dividido pelas diferentes origens, sendo proveniente do compartimento subterrâneo (1) nos momentos em que os compartimentos de destino se encontram com uma temperatura mais elevada e proveniente do exterior (0) nos momentos de maior conforto térmico, entenda-se, temperaturas mais baixas.

Tabela 4.18 - Exemplos de caudais da ventilação estufas internas (VG)

Compartimento		Horas														
O	D	8:30	10:00	10:15	11:45	12:00	13:30	13:45	15:15	15:30	17:00	17:15	18:45	19:00	20:30	24:00
0	2	0,112	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,112	0,152	0,112	0,132	0,132	0,112	0,112	0,112	0,112
34	2	0,000	0,132	0,112	0,132	0,132	0,112	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0	3	0,053	0,053	0,053	0,053	0,053	0,053	0,053	0,053	0,053	0,053	0,053	0,053	0,053	0,053	0,053
0	21	0,051	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,051	0,051	0,051
12	21	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,051	0,071	0,051	0,071	0,071	0,051	0,000	0,000	0,000
34	21	0,000	0,071	0,051	0,071	0,071	0,051	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0	41	0,055	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,055	0,075	0,055	0,075	0,075	0,055	0,055	0,055	0,055
34	41	0,000	0,075	0,055	0,075	0,075	0,055	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0	79	0,024	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,024	0,024	0,024
64	79	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,024	0,044	0,024	0,044	0,044	0,024	0,000	0,000	0,000
102	79	0,000	0,044	0,024	0,044	0,044	0,024	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

Legenda: O= compartimento de origem da ventilação; D=compartimento de destino da ventilação

À semelhança do que acontece no verão, na ventilação por estufas internas (tabela 4.18) os compartimentos de destino têm o seu caudal dividido em diversas origens, em determinados casos como o compartimento (21), o facto da temperatura deste ser bastante baixa durante todo o dia, justifica a necessidade de haver 3 compartimentos de origem, um para a manhã (34), outro para a tarde (12) e ainda outro para os momentos sem ocupação (0).

Deve-se realçar que na implementação destes sistemas de ventilação (VS e VG), não foi considerada a distância entre os compartimentos envolvidos. Deste modo, não há perdas de energia térmica associadas ao transporte dos caudais para os diferentes compartimentos envolvidos.

4.3.3 Verificação do melhor sistema de ventilação

Nesta fase para além da elaboração das VS e VG (ventilação estufas internas), pretende-se efetuar uma comparação entre as ventilações efetuadas de forma a perceber qual delas oferece melhores condições.

Para que se perceba realmente as vantagens de cada uma das ventilações e a influência destas no edifício, comparam-se 6 ventilações:

- **Ventilação Exterior 1 (VE1):** situação onde as trocas de ar são efetuadas apenas com o exterior, neste caso considerou-se um caudal de ventilação de 10L/s por pessoa adicionado a uma taxa de infiltração de uma renovação por hora (exemplo na tabela 4.16);

- **Ventilação Exterior 2 (VE2):** a tipologia do sistema é igual à do VE1, mas neste caso, será utilizado um caudal de ventilação de 20L/s por pessoa e uma taxa de infiltração de duas renovações por hora, pretende-se com este aumento verificar a influência do caudal no conforto térmico e qualidade do ar do edifício;
- **Ventilação Subterrânea 1 (VS1):** sistema em que o caudal de ventilação para determinados compartimentos é fornecido pelo compartimento 1. Neste caso são considerados, 10L/s por pessoa e uma renovação por hora (exemplo na tabela 4.17);
- **Ventilação Subterrânea 2 (VS2):** tipologia do sistema é igual à do VS1, mas neste caso, será utilizado um caudal de ventilação de 20L/s por pessoa e uma taxa de infiltração de duas renovações por hora;
- **Ventilação Estufas Internas (greenhouse) 1 (VG1):** Ventilação onde os compartimentos com menor temperatura são ventilados por compartimentos de maiores temperaturas, funcionando estes como estufa (*greenhouse*), neste sistema é considerado um caudal de 10L/s por pessoa e uma taxa de infiltração de uma renovação por hora (exemplo na tabela 4.18);
- **Ventilação Estufas Internas 2 (VG2):** a tipologia do sistema é igual à do VG1, mas neste caso, utilizou-se uma ventilação de 20 l/s por pessoa e uma taxa de infiltração de 2 renovações por hora.

Para cada um dos sistemas de ventilação apresentados acima efetuaram-se duas simulações, com dois mecanismos de ventilação diferentes:

- **Mecanismo de ventilação por impulsão (VI):** este consiste numa entrada de ar de grandes dimensões, numa zona perto do nível do chão e uma saída de ar perto do nível do teto;
- **Mecanismo de ventilação com jatos descendentes (JD):** consiste em várias entradas de ar de pequenas dimensões, que introduzem ar diretamente em cima do nível da cabeça dos ocupantes e duas saídas ao nível do teto, é de esperar que neste sistema as velocidades do ar aumentem em relação ao VI.

Dos sistemas e mecanismos de ventilação apresentados acima, uns foram estudados numa situação de verão, outros de inverno e outros foram estudados em ambas as situações, a figura 4.23 esquematiza as combinações efetuadas.

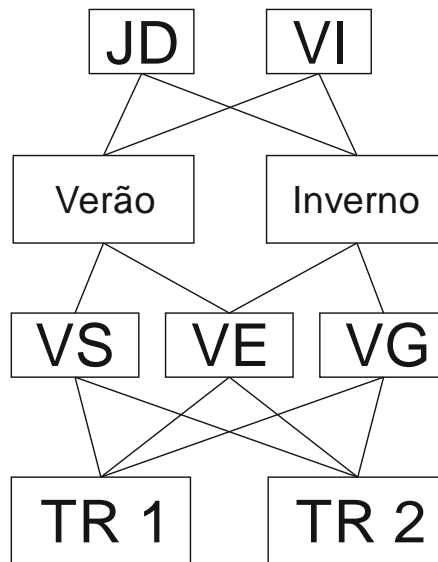


Figura 4.23 - Esquema dos sistemas e mecanismos de ventilação estudados

Legenda: JD (mecanismo de jatos descendentes); VI (mecanismo de ventilação por impulsão); VE (ventilação natural); VS (ventilação subterrânea); VG (ventilação por estufas internas); TR1 (caudal de 10 l/s e uma taxa de infiltração de uma renovação por hora); TR2: (caudal de 20 l/s e uma taxa de infiltração de duas renovações por hora).

Todas as comparações efetuadas nesta fase tiveram em consideração a **não** utilização de sistemas de climatização, isto é, os dados comparados referem-se ao comportamento do edifício em condições naturais.

4.4 4ª Fase – Implementação dos sistemas AVAC

Na fase anterior, com a comparação efetuada, tornou-se possível entender que tipo de ventilação favorecia o conforto térmico no edifício. Nesta fase do estudo pretende-se perceber as potencialidades de cada um dos seguintes sistemas de AVAC:

AVAC de Verão:

- **Termoconvectores com ciclo de compressão a vapor (compressão):** Este sistema de climatização é o mais convencional, onde o funcionamento dos termoconvectores é conseguido através de energia elétrica. Neste sistema estipulou-se que os compartimentos devem ser climatizados até os ocupantes atingirem uma categoria de conforto C (tabela 2.5), sendo apenas utilizada a energia necessária para manter esse mesmo nível.
- **Termoconvectores com ciclo de absorção (absorção):** baseia-se na utilização da energia solar incidente nos coletores, neste sistema de climatização o calor retirado

dos coletores é convertido em frio através do ciclo de absorção, que servirá para climatizar os compartimentos através de termoconvectores. Ao contrário do ciclo de compressão, este sistema está limitado à quantidade de energia térmica disponível para a climatização.

AVAC de Inverno:

- **Termoconvectores com ciclo de compressão a vapor (compressão):** O funcionamento é igual ao explicado acima para a situação de verão, no entanto no inverno o sistema está calibrado para obter um PMV pelo menos igual a -0.7, valor que representa a categoria C de conforto.
- **Termoconvectores com energia solar (termoconvectores):** Neste sistema de climatização o aquecimento dos espaços é feito através de termoconvectores que funcionam com a água aquecida pelos coletores solares, este sistema está dependente da quantidade de energia térmica disponível para efetuar a climatização dos espaços.

Nas comparações efetuadas nesta fase teve-se em consideração os sistemas referidos acima, de forma a compreender as diferenças entre eles, efetuou-se uma análise do PMV e do PPD, bem como das horas de frio e de calor para cada sistema. Desta forma tornou-se possível verificar qual o sistema mais indicado para a climatização do edifício.

Relativamente à energia disponível para os sistemas auxiliados pelos coletores solares (termoconvectores com energia solar e com ciclo de absorção), o *software* estava programado para considerar as eficiências dos coletores. Assim, de toda a energia solar incidente nos coletores, apenas parte dela foi utilizada como energia térmica na climatização.

4.5 5ª Fase – Análise de consumos energéticos

No que diz respeito à climatização, analisaram-se os consumos dos sistemas de AVAC utilizados e verificou-se a capacidade dos coletores solares produzirem energia suficiente para suportar esses sistemas.

Relativamente aos consumos inerentes à iluminação e informática, efetuou-se uma verificação dos sistemas de iluminação e concluiu-se que por cada 10 m² de área é utilizada uma armadura com uma composição de 4 lâmpadas de 18 Watt. Assim calcularam-se os gastos relativos à iluminação tendo em consideração a área de cada compartimento No que diz respeito à informática considerou-se o uso de dois computadores por gabinete.

5 Apresentação e discussão de resultados

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados das diferentes fases do estudo:

- 1ª Fase: Condições exteriores;
- 2ª Fase: Condições Interiores;
- 3ª Fase: Comparação dos sistemas de Ventilações;
- 4ª Fase: Comparação de Sistemas AVAC;
- 5ª Fase: Análise de consumos.

5.1 1ª Fase – Condições exteriores

A primeira fase do estudo permitiu recolher informações relativas ao exterior do edifício. A figura 5.24 representa a temperatura exterior esperada na região tendo em consideração o Solstício de Verão e de Inverno. Assim, estudando-se o edifício para estas condições, fica garantida a fiabilidade do projeto para os restantes dias.

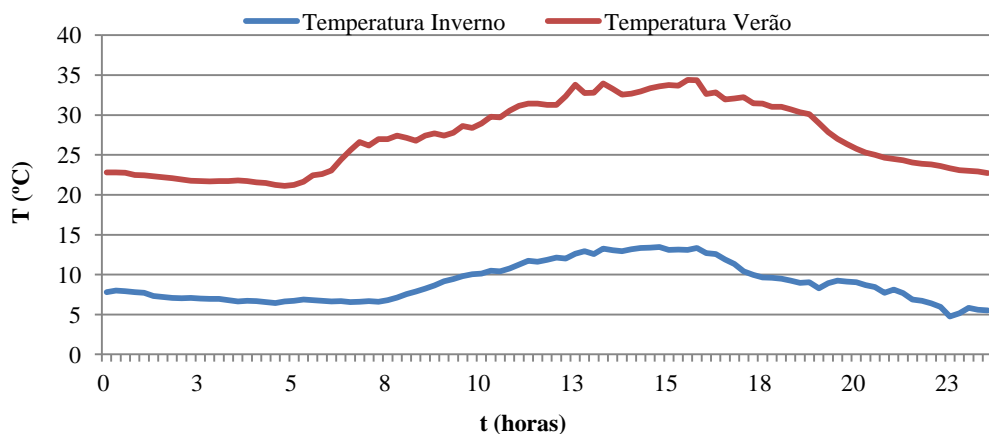


Figura 5.24 - Temperaturas exteriores (Verão e Inverno)

Tendo em consideração as superfícies que albergam os coletores solares, a figura 5.25 é representativa da radiação e potência por m^2 nessas superfícies.

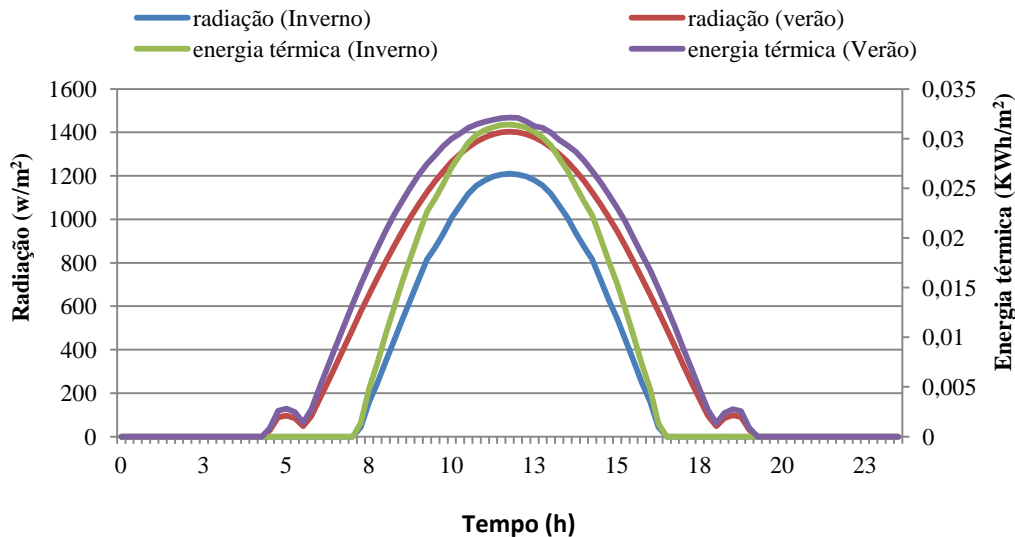


Figura 5.25 - Radiação e energia térmica por m² de coletor solar para o Verão e Inverno.

Como se verifica na figura 5.25, a inclinação dos coletores solares, de acordo com o que era expectável, permite que a radiação incidente varie pouco do Inverno para o Verão. Mais ainda, no que diz respeito à produção de energia o valor máximo que este atinge tanto no Inverno como no Verão é cerca de 0,03 KWh/m². No entanto, o facto de o dia ser maior no Verão resulta numa maior produção de energia. A tabela 5.19 representa o cálculo da energia produzida por dia em KWh.

Tabela 5.19 - Energia produzida nos coletores por dia

Energia Térmica Coletores		
Inverno	1305,497	KWh/dia
Verão	1837,043	KWh/dia

No entanto, da energia produzida pelos coletores apenas parte dela vai ser rentabilizada pelos sistemas AVAC, que funcionam através de energia solar (termoconvectores com energia solar e termoconvectores com ciclo de absorção, para Inverno e Verão respetivamente).

As figuras seguintes (figuras 5.26; 5.27 e 5.28) demonstram a radiação e a produção de energia esperada para as células fotovoltaicas implementadas, para as temporadas de Verão e de Inverno.

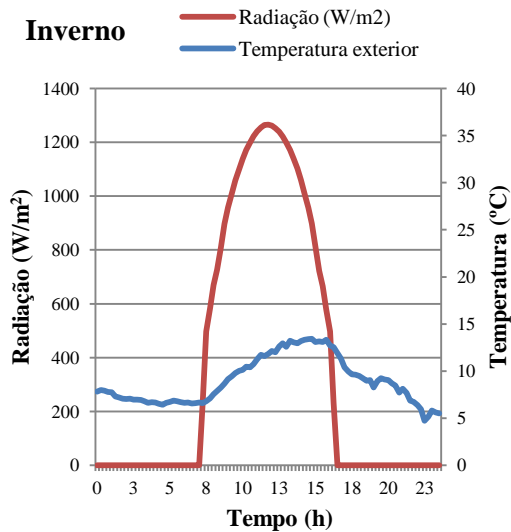


Figura 5.26 - Radiação incidente nas células fotovoltaicas e temperatura exterior (Verão)

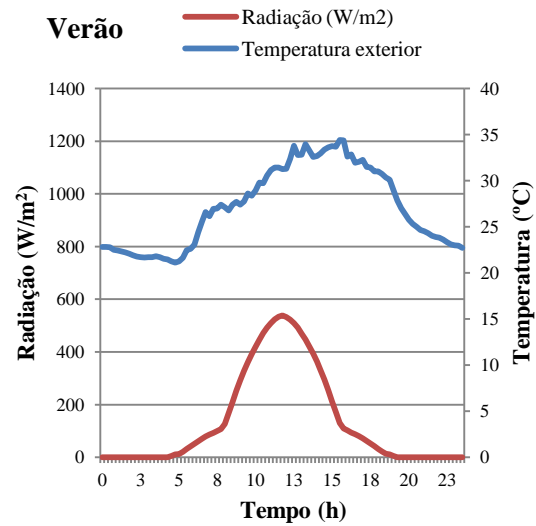


Figura 5.27 - Radiação incidente nas células fotovoltaicas e temperatura exterior (Inverno)

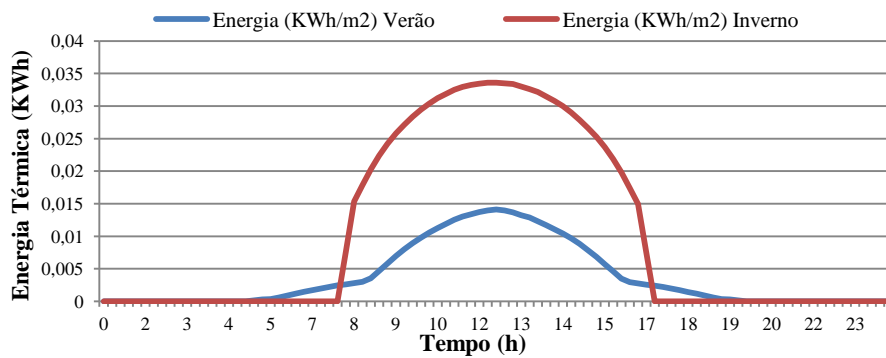


Figura 5.28 - Produção de energia nas células para as situações de Verão e de Inverno

As células, ao contrário dos coletores, encontram-se com uma inclinação de 90° em relação à horizontal, favorecendo assim a produção de energia no Inverno (figura 5.28), momento em que a inclinação do sol em relação à terra é menor. A tabela 5.20 ilustra a produção de energia por dia para as duas situações.

Tabela 5.20 - Produção de energia térmica nas células fotovoltaicas (Verão e Inverno)

Temporada	Verão	Inverno
Energia (KWh)/dia	190,8649	532,7149

5.2 Condições Interiores

Os sistemas de ventilação elaborados na 3ª Fase (implementação dos sistemas ventilação) da metodologia, tiveram por base dados da temperatura dos compartimentos. De forma a justificar as escolhas efetuadas na VG (ventilação estufas internas) e VS (ventilação subterrânea), para o Inverno e Verão respetivamente, as figuras apresentadas em seguida revelam a temperatura dos compartimentos envolvidos nas duas tipologias, antes e depois da implementação das mesmas.

Verão

A ventilação elaborada para o Verão, ventilação subterrânea, teve por base o uso do compartimento 1 (subterrâneo) para auxiliar o aumento do conforto térmico no interior do edifício. A figura 5.29 demonstra o estado dos compartimentos envolvidos na VS antes da implementação da mesma.

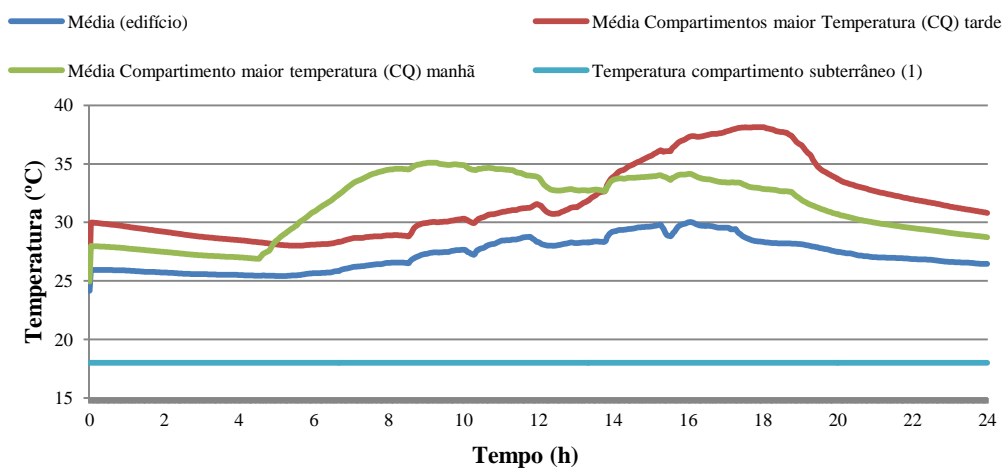


Figura 5.29 - Temperatura dos compartimentos com a ventilação exterior 1 (VE1).

Como se verifica, os compartimentos de maior temperatura (CQ) que foram selecionados para a VS encontram-se com temperaturas bem superiores à média do edifício, justificando as escolhas feitas para o sistema de ventilação. Para que se verifique a possibilidade de aumentar a ventilação para os respetivos CQ, a figura seguinte representa a temperatura dos compartimentos após a implementação da VS.

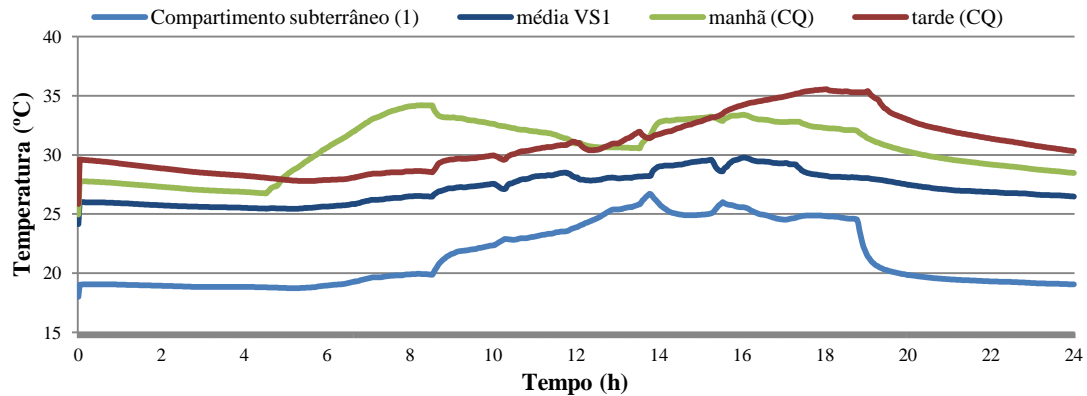


Figura 5.30 - Temperatura dos compartimentos com a ventilação subterrânea 1 (VS1)

Na análise da figura 5.30 deve ser considerado o facto de o sistema de ventilação VS ser direccionado para os compartimentos a Este (manhã) entre 8h e as 13h, verificando-se uma descida da temperatura dos mesmos em comparação com a figura 5.29, o mesmo acontece para os compartimentos virados a Oeste (tarde), onde o sistema opera entre 13h e as 19h.

Como seria espectável a utilização do ar existente no compartimento subterrâneo (CS), resulta num aumento da temperatura do mesmo, consequência da compensação ser efetuada com a entrada de ar do exterior que se encontra a uma temperatura mais elevada. No entanto apesar do aumento da temperatura no CS, verifica-se que este tem capacidade para o aumento da exploração. A figura 5.31 representa a temperatura dos compartimentos envolvidos no VS2 após a implementação da mesma.

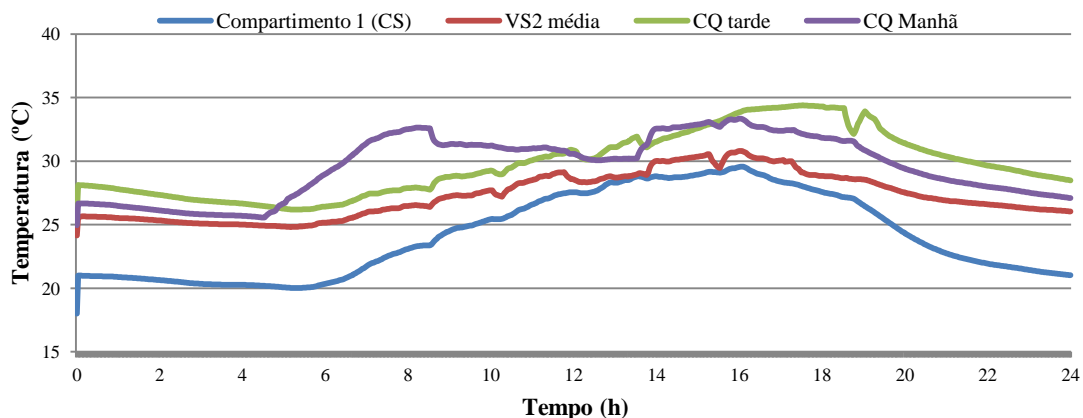


Figura 5.31 - Temperatura dos compartimentos com a Ventilação subterrânea 2 (VS2)

Como já foi referido anteriormente, a VS2 explora duas vezes mais o CS do que a VS1, isto é, a quantidade de ar que é extraída do compartimento subterrâneo é de 20l/s por pessoa, nos momentos de ocupação do edifício, e 2 renovações por hora nos momentos em que o edifício se encontra desocupado.

Verifica-se que o CS com este sistema (VS2) atinge valores de temperatura perto da média do edifício, limitando o aumento do caudal de exploração do mesmo.

Inverno

A ventilação elaborada no Inverno teve por base a utilização de estufas para auxiliar a o aumento da temperatura nos compartimentos mais frios. A figura seguinte representa as temperaturas dos compartimentos envolvidos na VG (ventilação estufas internas) antes da sua implementação.

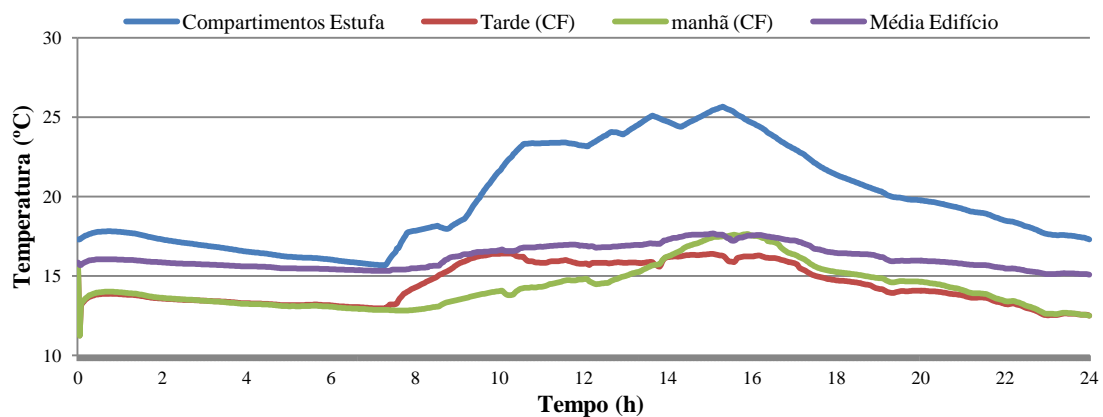


Figura 5.32 - Temperatura dos compartimentos com a VE1 (Inverno)

Os resultados apresentados acima revelam as condições do edifício tendo em consideração a VE1. Como se verifica, os CF que foram selecionados para serem climatizados pelos compartimentos estufa (CE), encontram-se a uma temperatura bem inferior àquela que é a média do edifício. A diferença entre os CF e os CE, demonstram a alta potencialidade do sistema de ventilação VG1.

De forma a perceber a capacidade térmica dos compartimentos envolvidos na VG1, a figura seguinte demonstra o comportamento dos compartimentos apos a implementação da VG1.

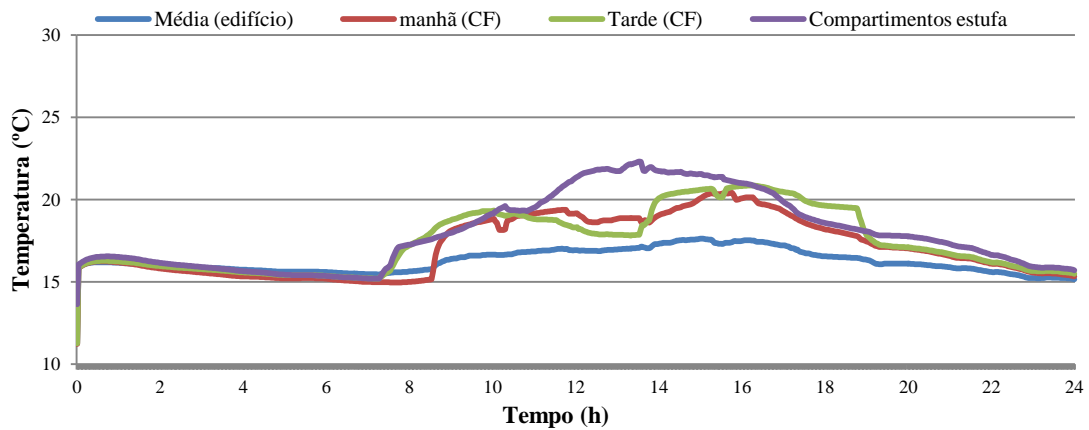


Figura 5.33 - Temperatura dos compartimentos com a VG1 (Inverno)

Como se verifica (figura 5.33) a temperatura nos compartimentos frios aumentou bastante com o novo sistema de ventilação, como aconteceu no sistema de Verão, naturalmente que a exploração de ar dos CE deve ser compensado com ar fresco do exterior, o que resulta numa diminuição da temperatura do mesmo. Deste modo, devem ser percebidos os limites dos CE, a figura 5.34 ilustra as temperaturas dos compartimentos tendo em consideração a VG2.

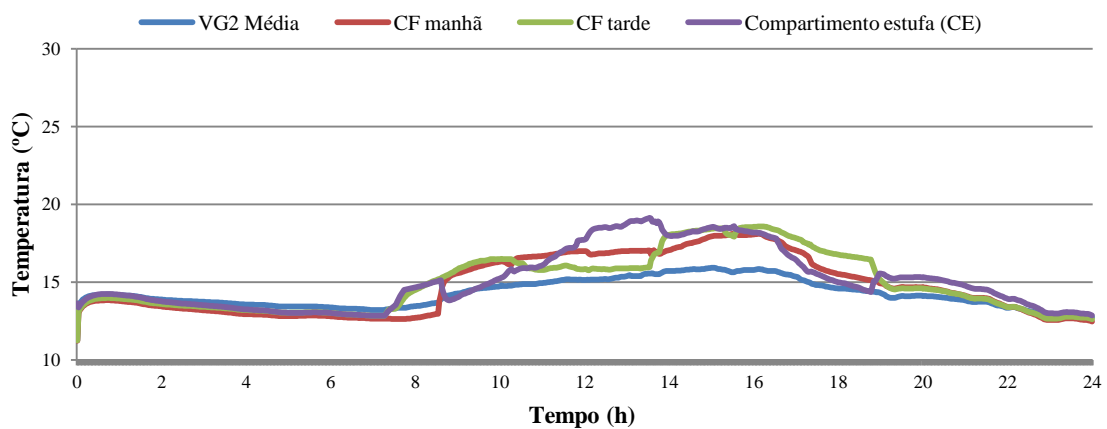


Figura 5.34 - Temperatura dos compartimentos com a VG2 (Inverno)

Como se verifica na figura 5.34, o aumento do caudal de ventilação realizado na VG2 resultou na diminuição geral da temperatura, provavelmente devido ao facto da temperatura exterior ser muito baixa em comparação com aquela que se fazia sentir no interior. Como a VG2 tem na sua tipologia uma maior exploração dos compartimentos estufa, duas vezes superior, esta exploração é compensada com um aumento do caudal de ar exterior. Resultando numa queda brusca da temperatura.

5.3 Comparação Ventilações

Na fase anterior foram demonstradas as vantagens térmicas das VG e VS para o Inverno e Verão, respetivamente. No entanto há outros parâmetros que devem ser considerados quando se trata de conforto térmico e qualidade do ar interior, nesse sentido, nesta fase pretende-se comparar todos os sistemas de ventilação estudados de forma a perceber aqueles que mais se adequam às diferentes estações.

Verão

As figuras 5.35 e 5.36 demonstram a variação de temperatura média no edifício tendo em consideração as quatro ventilações (VS1;VS2;VE1;VE2) utilizadas no Verão para os mecanismos de jatos descendentes (JD) e ventilação por impulsão (VI).

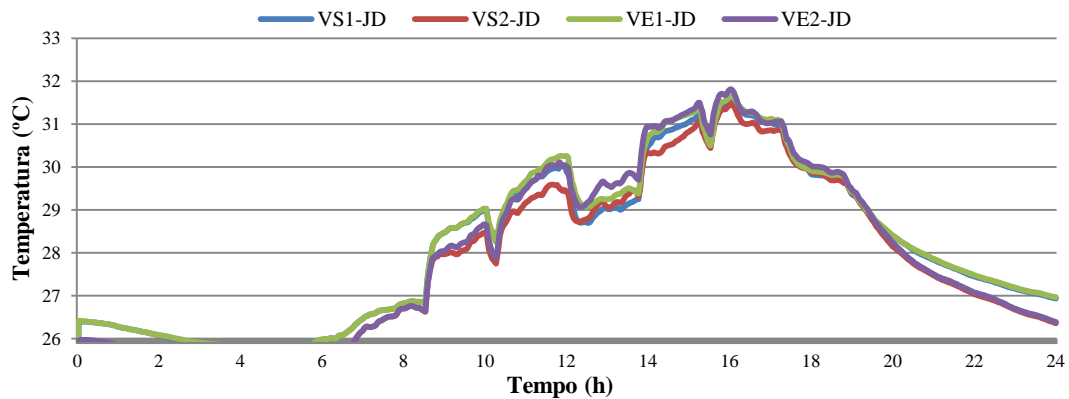


Figura 5.35 - Temperatura média do edifício para a VS1,VS2,VE1,VE2 utilizando um mecanismo de Jatos descendentes (JD)

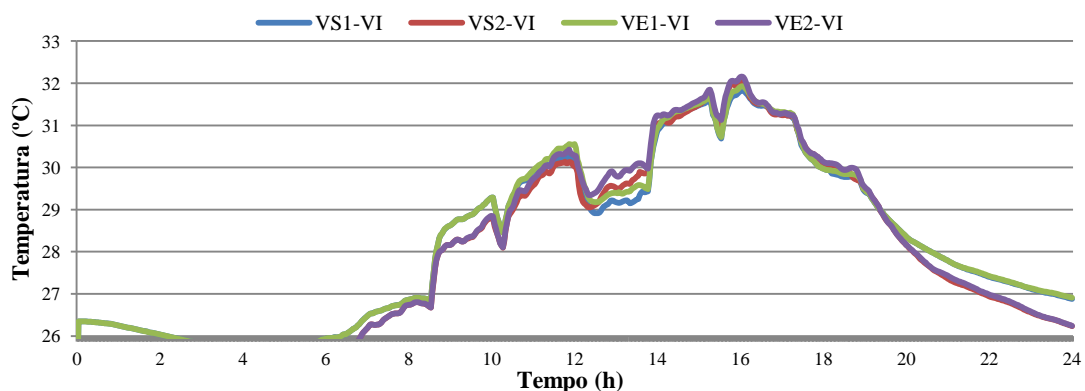


Figura 5.36 - Temperatura média do edifício para a VS1,VS2,VE1,VE2 utilizando um mecanismo de Ventilação por Impulsão (VI)

Analisando as duas figuras (5.35 e 5.36), consegue-se perceber que as diferenças na temperatura média do edifício, variam mais no sistema de jatos descendentes que no sistema de ventilação por impulsão. No entanto, verifica-se que para os dois sistemas (JD e VI), a VS2 é aquela que nos momentos de ocupação se encontra com temperaturas mais baixas.

Um parâmetro que deve também ser verificado para a escolha do sistema de ventilação é o CO₂, este tem como limite aceitável os 1800 mg/m³. As figuras seguintes representam os valores máximos de CO₂ encontrados no edifício ao longo do dia.

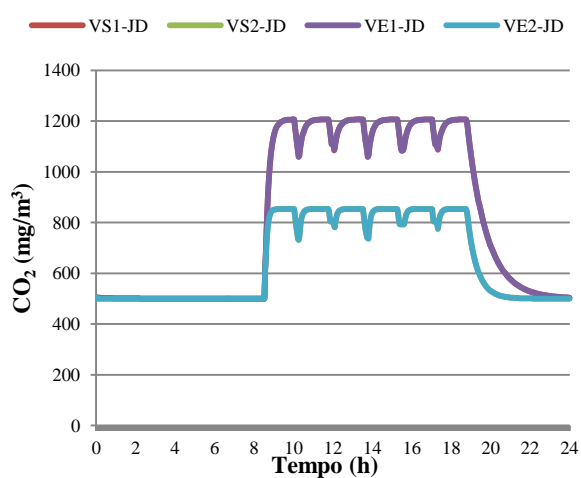


Figura 5.37 - Nível máximo de CO₂ no edifício para a VS1, VS2, VE1, VE2 utilizando um mecanismo de jatos descendentes (JD)

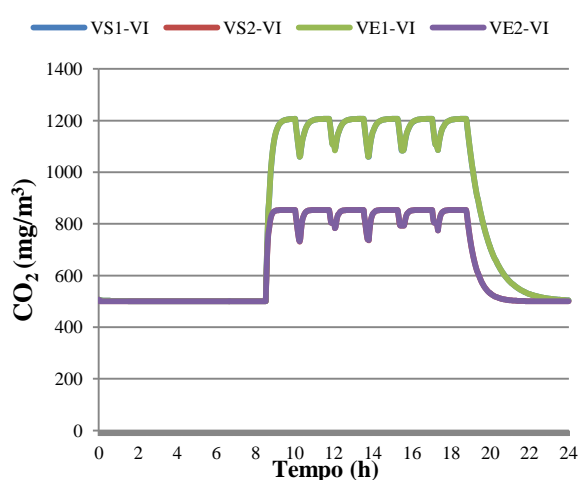


Figura 5.38 - Nível máximo de CO₂ no edifício para a VS1, VS2, VE1, VE2 utilizando um mecanismo de Ventilação por Impulsão (VI)

As figuras demonstram que a ventilação VS não altera a quantidade de CO₂ em comparação com o sistema VE, também não se verifica nenhuma alteração do mecanismo JD para com mecanismo VI. Tal como ilustram as figuras 5.37 e 5.38, a única variável que influencia a variação de CO₂ é a taxa de ventilação, que nos sistemas VE1 e VS1 é de 10 L/s por pessoa, adicionado a uma renovação por hora do volume do compartimento, enquanto os sistemas VE2 e VS2, possuem uma ventilação de 20 L/s por pessoa e de duas renovações por hora. Este aumento da quantidade de ar resulta numa diminuição do CO₂ no interior do edifício. Contudo, nenhum dos sistemas apresenta valores superiores aos 1800 mg/m³, o que significa que este não é um fator eliminatório para a escolha da ventilação.

A velocidade do ar é outro dos parâmetros que deve ser controlado, este vem no sentido de garantir a inexistência de desconforto térmico local, as figuras 5.39 e 5.40

representam, para os sistemas que têm sido analisados, as velocidades máximas encontradas no edifício ao longo do dia em todos os compartimentos excepto o CS (compartimento subterrâneo).

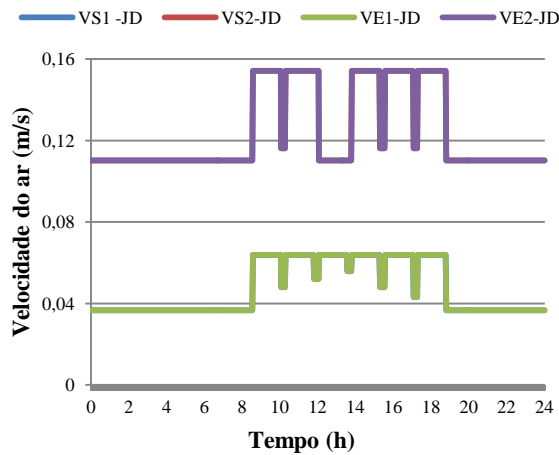


Figura 5.39 - Velocidade do ar máxima no edifício para a VS1,VS2,VE1,VE2 utilizando o mecanismo de jatos descendentes (JD)

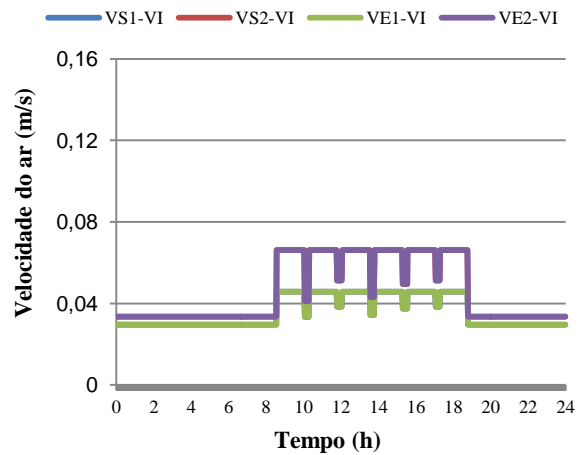


Figura 5.40 - Velocidade do ar máxima no edifício para a VS1,VS2,VE1,VE2 utilizando o mecanismo de jatos descendentes (JD)

Neste parâmetro as diferenças entre os sistemas estudados evidenciam-se, primeiro, o sistema de jatos descendentes (JD) apresenta maiores velocidades que o sistema de ventilação por impulsão (VI). Para além disso, como expectável as ventilações VS2 e VE2 têm maiores velocidades, resultado dos maiores caudais de ventilação das mesmas. Mais uma vez, apesar das diferenças, o limite estipulado para a velocidade é 0,8 m/s, e como se verifica nenhum dos sistemas atinge esses valores. Contudo pode existir desconforto térmico local, tornando-se relevante verificar o risco de resfriamento para a situação mais crítica.

A velocidade máxima encontrada em todos os sistemas de ventilação usados é de aproximadamente 0,15 m/s, correspondente ao compartimento 309, que no preciso momento tem uma temperatura aproximada de 26°C. Assim, utilizando a equação (4) para o cálculo do risco de resfriamento obtêm-se:

$$DR = (34 - t)(v - 0,05)^{0,62} \cdot (0,37 \cdot v \cdot Tu + 3,14) \leftrightarrow$$

$$\leftrightarrow DR = (34 - 26)(0,15 - 0,05)^{0,62} \cdot (0,37 \cdot 0,15 \cdot 40 + 3,14) \leftrightarrow$$

$$\leftrightarrow DR = 10,6 \cong 11\%$$

Onde:

t = temperatura local (°C);

v = velocidade do ar (m/s);

Tu= intensidade da turbulência (%), usar 40% quando desconhecido.

Como demonstra a tabela 2.5, referente às zonas de conforto, verifica-se que o risco de resfriamento calculado em 11% está dentro das zonas de conforto. Segundo a ISO 7730 (2005), só para um risco de resfriamento superior a 30% deixa de existir conforto térmico.

As análises efetuadas para os parâmetros de conforto térmico e qualidade do ar demonstram que, em nenhum dos casos há excedência de limites legislados, não sendo possível até então excluir nenhum dos sistemas analisados. Com o intuito de ser perceber qual dos sistemas é na realidade o mais rentável a tabela 5.21 resume alguns dos valores apresentados acima, bem como incorpora outros parâmetros relevantes para a escolha do sistema a utilizar.

Tabela 5.21- Resultados obtidos, relevantes para a análise do conforto térmico e qualidade do ar (Verão)

Ventilações	VE1	VE2	VS1	VS2	Valor Limite	Parâmetros
JD	24,631	24,386	24,630	24,386	-	Temperatura média manhã (°C) (8:00-12:30)
VI	24,610	24,328	24,610	24,328		
JD	30,440	29,014	30,072	28,397	-	Temperatura média tarde (°C) (13:30-19:00)
VI	30,485	28,985	30,250	28,721		
JD	3608,146	3471,173	3481,321	3149,338	-	Horas de Calor (h)
VI	3691,032	3557,810	3613,318	3436,714		
JD	1206,562	853,319	1206,563	853,319	1800	Co2 máximo (mg/m ³)
VI	1206,561	853,319	1206,560	853,319		
JD	0,064	0,154	0,064	0,154	0,8	Velocidade do ar máxima (m/s)
VI	0,046	0,066	0,046	0,066		
JD	26,855	26,834	26,836	26,748	-	Temperatura média radiante (°C)
VI	26,860	26,794	26,852	26,788		

Legenda: Vi, Ventilação por impulsão; JD, Jatos descendentes; VE1, ventilação exterior 1; VE2, Ventilação exterior 2; VS1, Ventilação subterrânea 1; VS2, Ventilação subterrânea 2

Com o auxílio da tabela 5.21 tornam-se mais perceptíveis as vantagens da VS2 em relação às restantes, assim relativamente ao Verão pode-se concluir que a VS2 é aquela que oferece melhores condições para a rentabilização do edifício. Relativamente às tipologias JD e VI, aquela que favorece a sustentabilidade energética do edifício é a JD, justificado pelo facto do edifício ao ser ventilado com este sistema reduzir substancialmente o número de horas de calor, permitindo desta forma diminuir os consumos por parte dos sistemas de AVAC que serão incorporados na fase seguinte.

Inverno

Escolhida a ventilação a utilizar na estação mais quente, deve-se agora, com o mesmo tipo de análise perceber qual a mais adequada para a estação mais fria. Tal como apresentado anteriormente, em primeiro lugar deve-se verificar as diferenças térmicas para os sistemas de ventilação estudados. As figuras seguintes representam a temperatura média do edifício para as diferentes ventilações.

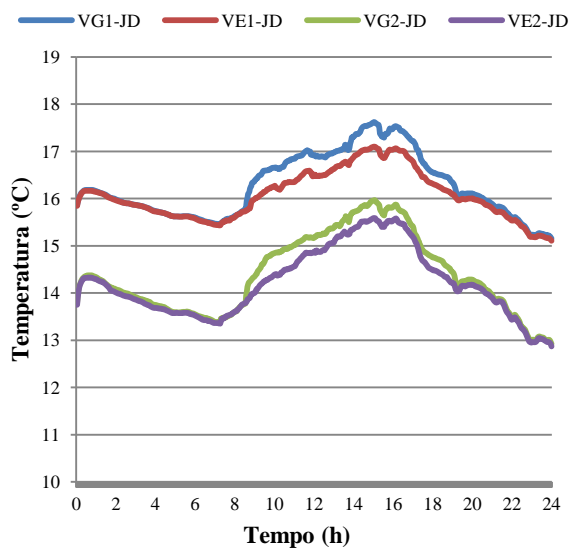


Figura 5.41 - Temperatura média do edifício com as diferentes ventilações para o mecanismo de jatos descendentes (Inverno)

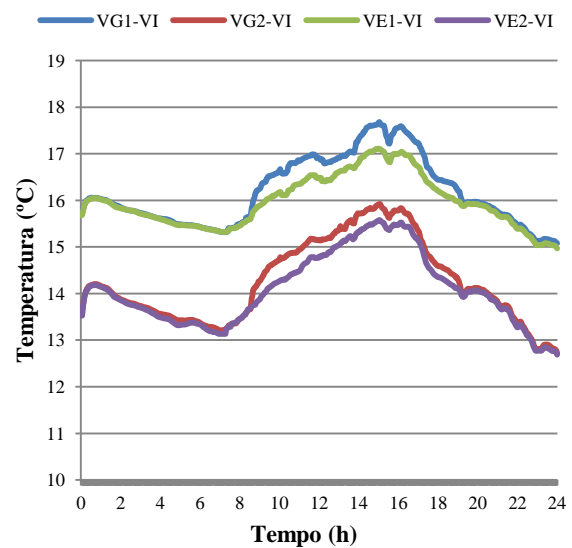


Figura 5.42 - Temperatura média do edifício com as diferentes ventilações para o mecanismo de ventilação por impulsão (Inverno)

Analisando as figuras 5.41 e 5.42, verifica-se que a VG1 é aquela que oferece as melhores condições térmicas para a rentabilização do edifício. No entanto, devem ser analisados outros parâmetros de forma a garantir que não há nenhum impedimento à utilização do sistema referido.

Sendo a VG1 uma ventilação com menor caudal, comparativamente com a VG2 ou VE2, o valor máximo de CO₂ deve ser verificado de forma garantir que este não ultrapassa o limite estipulado (Figuras 5.43 e 5.44)

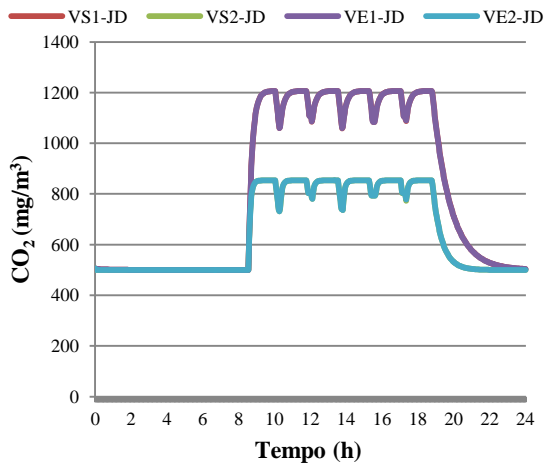


Figura 5.43 - Nível máximo de CO₂ no edifício para a VG1, VG2, VE1, VE2 utilizando um mecanismo de jatos descendentes (JD) (Inverno)

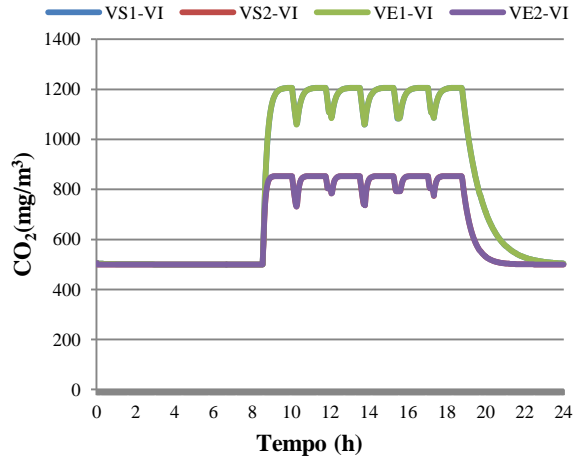


Figura 5.44 - Nível máximo de CO₂ no edifício para a VG1, VG2, VE1, VE2 utilizando um mecanismo de ventilação por impulsão (VI) (Inverno)

Através da análise das figuras 5.43 e 5.44, percebe-se que nenhum dos sistemas de ventilação atinge os valores limites para o CO₂.

A apresentação dos resultados referentes à velocidade do ar tal como no verão não têm em consideração o CS, isto porque se trata de um compartimento subterrâneo sem ocupação. As figuras 5.45 e 5.46 ilustram as velocidades máximas encontradas para os sistemas de ventilação estudados.

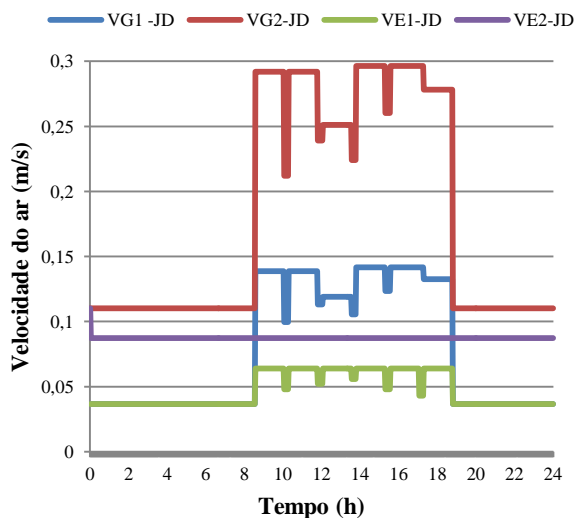


Figura 5.45 - Velocidade do ar máxima no edifício para a VG1, VG2, VE1, VE2 utilizando o mecanismo de jatos descendentes (JD) (Inverno)

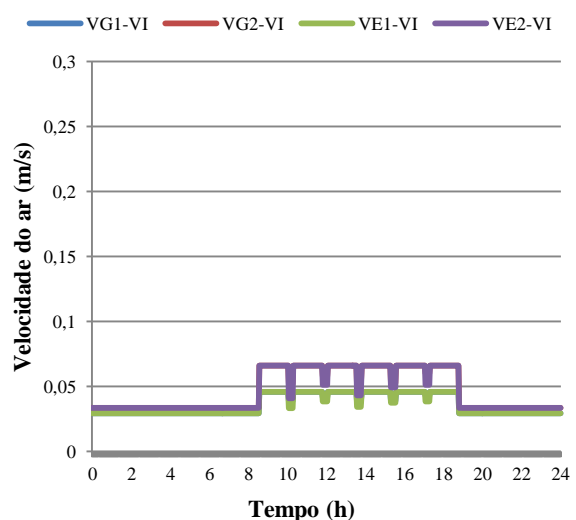


Figura 5.46 - Velocidade do ar máxima no edifício para a VG1, VG2, VE1, VE2 utilizando o mecanismo de ventilação por impulsão (VI) (Inverno)

No sistema de jatos descendentes verifica-se que as velocidades do ar são mais elevadas que no sistema de ventilação por impulsão. Isso nota-se ainda mais nos CE, que por serem utilizados para ventilar outros compartimentos, necessitam de uma maior reposição de ar por parte do exterior. A tabela 5.22 revela as velocidades máximas para cada um destes espaços.

Tabela 5.22 - Compartimentos com maior velocidade do ar para as ventilações VG1 e VG2 no mecanismo de jatos descendentes.

Ventilação Estufas Internas - Jatos descendentes			
VG2		VG1	
Compartimento	Velocidade máxima do ar (m/s)	Compartimento	Velocidade máxima do ar (m/s)
102	0,318723	102	0,152855
64	0,2962704	64	0,1415984
132	0,2926312	132	0,1397789
150	0,2918413	34	0,1386434
34	0,2902999	150	0,1384391
12	0,2495893	12	0,1254524

Para os compartimentos que apresentam maior velocidade do ar, calculou-se o risco de resfriamento, a temperatura para o compartimento 102 no momento de velocidade máxima é de 21°C para o VG1 e de 19°C para o VG2.

- Risco de resfriamento máximo em **VG1**:

$$DR = (34 - t)(v - 0,05)^{0,62} \cdot (0,37 \cdot v \cdot Tu + 3,14) \leftrightarrow$$

$$\leftrightarrow DR = (34 - 21)(0,153 - 0,05)^{0,62} \cdot (0,37 * 0,153 * 40 + 3,14) \leftrightarrow$$

$$\leftrightarrow DR = 17,16 \cong 17\%$$

- Risco de resfriamento máximo em **VG2**:

$$DR = (34 - t)(v - 0,05)^{0,62} \cdot (0,37 \cdot v \cdot Tu + 3,14) \leftrightarrow$$

$$\leftrightarrow DR = (34 - 19)(0,319 - 0,05)^{0,62} \cdot (0,37 * 0,319 * 40 + 3,14) \leftrightarrow$$

$$DR = 52,18 \cong 52\%$$

Onde:

t = temperatura local (°C);

v = velocidade do ar (m/s);

Tu= intensidade da turbulência (%), usar 40% quando desconhecido.

Como se verifica através dos cálculos efetuados, a VG2 para o mecanismo de jatos descendentes tem pelo menos um compartimento, o 102, onde o risco de resfriamento é demasiado elevado, sendo superior ao limite de 30% recomendado pela ISO 7730 (2005). Relativamente à VG1 os 17 % obtidos para o compartimento 102, garantem que, mesmo no momento em que este regista uma maior velocidade do ar, não há diminuição do conforto térmico.

O cálculo do risco de resfriamento é importante para os CE, porque apesar de ter sido considerado que estes não têm ocupação permanente, como se tratam de corredores, numa situação real eles serão ocupados momentaneamente. Assim, verificado o risco de resfriamento fica garantido que os ocupantes não sentem desconforto quando circulam nesses compartimentos.

No entanto para confirmar as vantagens da VG1 em relação às restantes a tabela 5.23 compara os resultados obtidos para as diferentes ventilações.

Tabela 5.23 - Resultados obtidos, relevantes para a análise do conforto térmico e qualidade do ar (Inverno)

Ventilações	VE1	VE2	VG1	VG2	Valor Limite	Parâmetros
JD	16,248	14,433	16,663	14,881	-	Temperatura média manhã (°C) (8:00-12:30)
VI	16,172	14,329	16,635	14,817		
JD	16,920	15,405	17,367	15,728	-	Temperatura média tarde (°C) (13:30-19:00)
VI	16,913	15,388	17,389	15,713		
JD	1529,022	2674,324	1155,409	2214,466	-	Horas de Frio (h)
VI	1501,002	2651,956	1162,140	2256,783		
JD	1206,562	853,319	1206,563	853,319	1800	Co2 máximo (mg/m ³)
VI	1206,561	853,319	1206,560	853,319		
JD	0,064	0,110	0,153	0,319	0,8	Velocidade do ar máxima (m/s)
VI	0,046	0,066	0,046	0,066		
JD	17,049	15,595	17,221	15,744	-	Temperatura média radiante (°C)
VI	17,044	15,631	17,213	15,775		

Legenda: Vi, Ventilação por impulso; JD, Jatos descendentes; VE1, ventilação exterior 1; VE2, Ventilação exterior 2; VG1, Ventilação estufas internas 1; VG2, Ventilação estufas internas 2

Analisando a tabela 5.23 verifica-se que a ventilação mais adequada para o Inverno é a VG1-JD, no que diz respeito a horas de frio, este sistema é aquele que oferece melhores condições térmicas. Apresentando como única desvantagem o facto de o nível de CO₂ ser superior quando comparado com a VG2 ou VE2, contudo, esta mantém-se dentro dos valores limites (1800 mg/m³).

5.4 Comparação Sistemas AVAC

Nesta fase pretende-se comparar os sistemas de climatização AVAC utilizados, para isso utilizaram-se os índices PMV e PPD.

Para a análise do PMV e PPD teve-se em consideração a percentagem de ocupação para a seleção dos compartimentos a serem estudados, a figura 5.47 demonstra que os gabinetes e laboratórios são os locais em que os ocupantes permanecem a maior parte do seu tempo. Para perceber a influência da localização, estudaram-se os gabinetes e laboratório com orientações distintas (Norte, Sul, Este e Oeste).

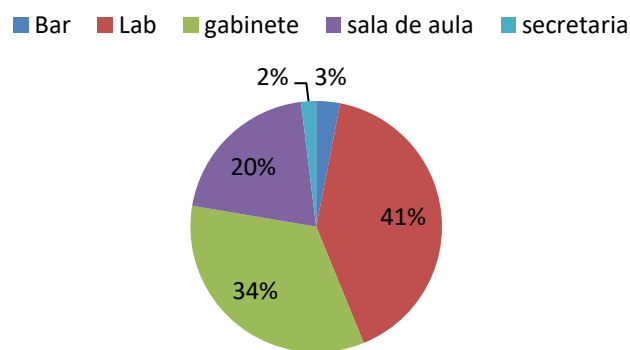
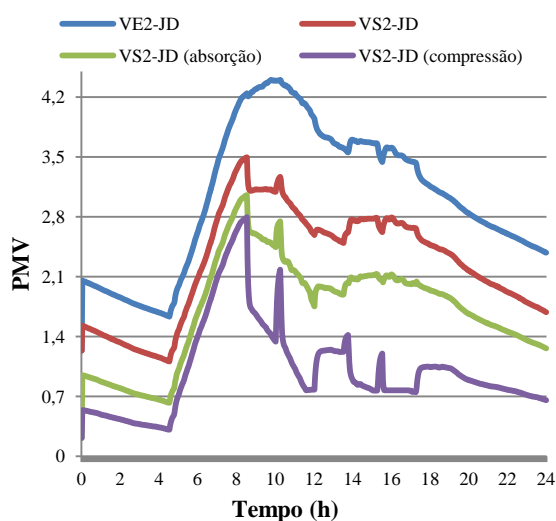
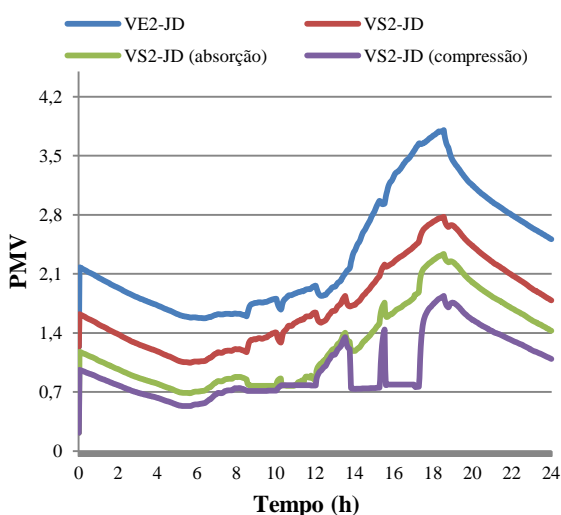


Figura 5.47 - Percentagem de ocupação em cada compartimento

Verão

Em primeiro lugar comparou-se a variação do PMV nos diferentes gabinetes. Com esta comparação pretende-se verificar as diferenças entre os sistemas AVAC utilizados. Recapitulando, utilizaram-se dois sistemas à base de termoconvectores, um sistema tem por base a energia térmica proveniente dos coletores solares, que através do ciclo de absorção refrigera os compartimentos (VS2-JD absorção), o outro serve-se de energia elétrica que através do ciclo de compressão a vapor (VS2-JD compressão) climatiza o edifício. É importante realçar que nos gabinetes o edificio se encontra ocupado entre as 8:30 e as 17:15 (tabela 4.14), no entanto ao longo do dia existem intervalos, momentos em os compartimentos se encontram desocupados, esses momentos serão visíveis nas figuras 5.48 e 5.49, notando-se um aumento momentâneo do PMV.

Gabinete 212 (Este)**Figura 5.48** - Comparação do PMV para os sistemas AVAC, Verão, Gabinete, Este.**Gabinete 177 (Oeste)****Figura 5.49** - Comparação do PMV para os sistemas AVAC, Verão, Gabinete, Oeste

Como já foi referido, a climatização pelo ciclo de compressão a vapor no Verão está programada para que o PMV atinja os 0,7, independentemente do consumo energético envolvido, o mesmo não acontece com o ciclo de absorção, que utiliza apenas a energia térmica disponível nos coletores solares para a climatização. Este facto é observável nos gabinetes 212 e 177 (figuras 5.48 e 5.49), onde o ciclo de absorção não consegue garantir o mesmo conforto térmico que o ciclo de compressão a vapor. No entanto, como se verifica no gabinete 212, mesmo para o sistema mais eficaz, o PMV só atinge valores perto do 0,7 algures entre as 10 e 12h, isto porque, o compartimento em questão apresenta uma temperatura muito elevada de manhã, consequência de estar orientado a Este, e mesmo com o auxílio dos termoconvectores, a temperatura no seu interior só se torna confortável por volta das 11 horas.

Relativamente ao compartimento 177 orientado a Oeste, este experimenta um aumento da temperatura à tarde, a partir das 14h, mas como o sistema de climatização de compressão a vapor está a operar desde as 8h este é capaz de controlar esse aumento, mantendo o nível de PMV próximo de 0,7. Verifica-se que em ambos os gabinetes, há momentos em que o PMV aumenta momentaneamente para os dois sistemas de climatização (absorção e compressão), pois são momentos de intervalo em que os compartimentos se encontram desocupados, e consequentemente os termoconvectores desligam.

As figuras seguintes ilustram o PMV para os sistemas AVAC nos gabinetes orientados a Sul (figura 5.50) e a Norte (figura 5.51).

Gabinete 149 (Sul)

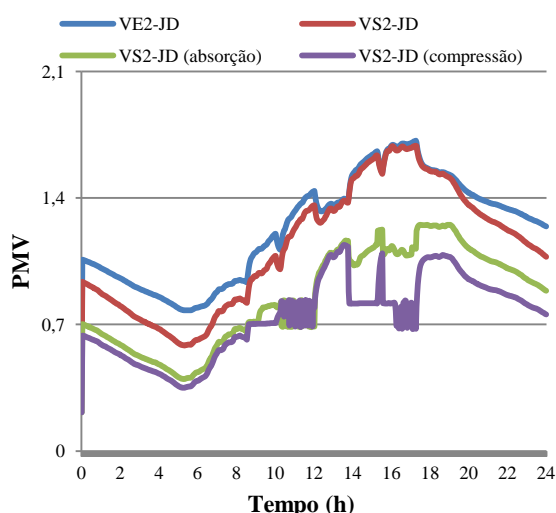


Figura 5.50 - Comparação do PMV para os sistemas AVAC, Verão, Gabinete, Sul.

Gabinete 240 (Norte)

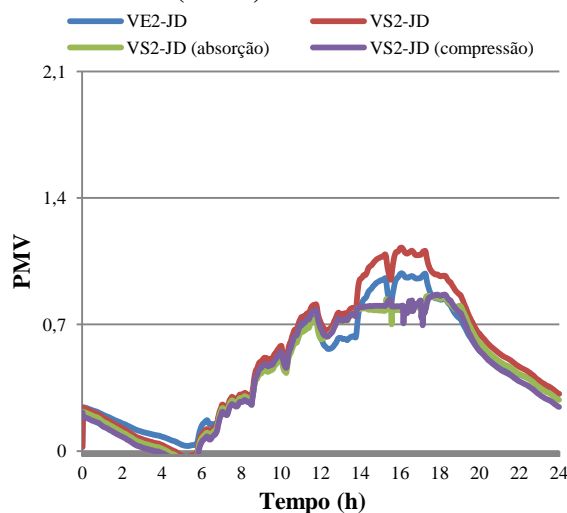


Figura 5.51 - Comparação do PMV para os sistemas AVAC, Verão, Gabinete, Norte.

Comparando o gabinete orientado a Sul com o orientado a Norte, verifica-se que o primeiro tem um PMV mais elevado que o segundo, fruto da sua orientação. Mais concretamente no gabinete 149 (figura 5.50), apenas o sistema de climatização por compressão a vapor possibilita a existência de conforto térmico (valores próximos de 0,7). Ao contrário, no gabinete 240 (Norte), o facto de este não atingir temperaturas tão elevadas como os restantes permite uma climatização eficaz tanto pelo sistema de absorção como pelo sistema de compressão. Analisados os gabinetes, pretende-se agora analisar o índice PMV para os laboratórios (figuras 5.52, 5.53, 5.54 e 5.55)

Laboratório 208 (Este)

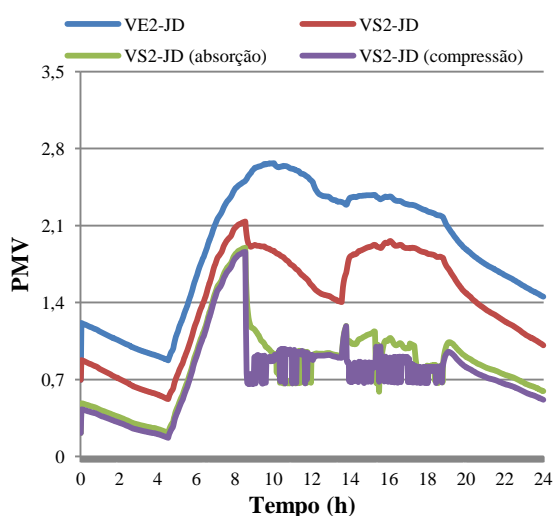


Figura 5.52 - Comparação do PMV para os sistemas AVAC, Verão, Laboratório, Este.

Laboratório 61 (Oeste)

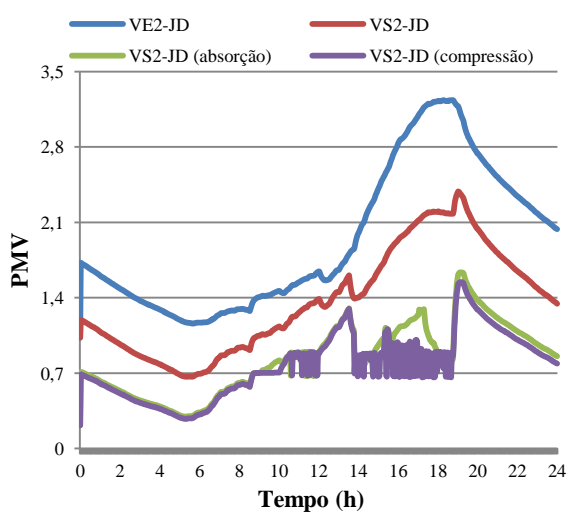


Figura 5.53 - Comparação do PMV para os sistemas AVAC, Verão, Laboratório, Oeste.

No que diz respeito aos laboratórios, tal como nos gabinetes verifica-se que o sistema de absorção não consegue atingir o mesmo nível de conforto que o sistema de compressão a vapor, resultado da falta de energia disponível pelos coletores para a climatização dos mesmos. À semelhança do que acontece nos gabinetes orientado a Este e Oeste (figuras 5.48 e 5.49) também nos laboratórios com a mesma orientação (figuras 5.52 e 5.53) se verifica a melhoria do índice PMV com a implementação dos sistemas de climatização AVAC (compressão e absorção). As figuras seguintes apresentam o índice PMV para os laboratórios orientados a Sul (figura 5.54) e a Norte (5.55).

Laboratório 291 (Sul)

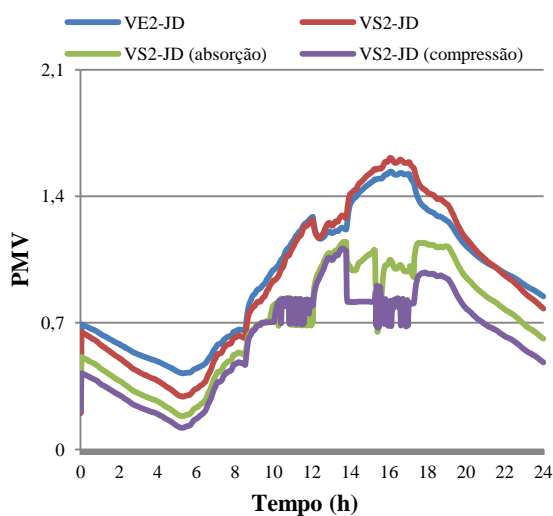


Figura 5.54 - Comparação do PMV para os sistemas AVAC, Verão, Laboratório, Sul

Laboratório 306 (Norte)

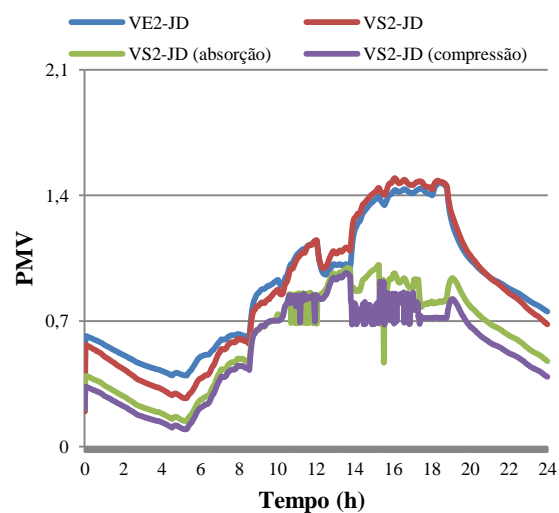


Figura 5.55 - Comparação do PMV para os sistemas AVAC, Verão, Laboratório, Norte

Nos laboratórios, tal como nos gabinetes, verificam-se as diferenças entre a VS2-JD e a VE2-JD, nos compartimentos orientados a Este e a Oeste. No entanto, ao contrário do que acontece nos gabinetes, os laboratórios com o sistema de absorção conseguem atingir valores de PMV mais próximos do conforto de categoria C ($PMV=0,7$).

De forma a compreender melhor a satisfação dos ocupantes no interior do edifício efetuou-se a análise do PPD para os mesmos gabinetes (figuras 5.56;5.57;5.58;5.58) e laboratórios.

Gabinete 212 (Este)

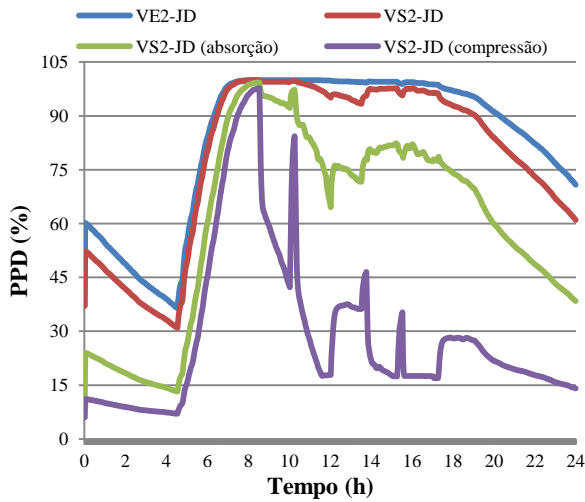


Figura 5.56 - Comparação do PPD para os sistemas AVAC, Verão, Gabinete, Este.

Gabinete 177 (Oeste)

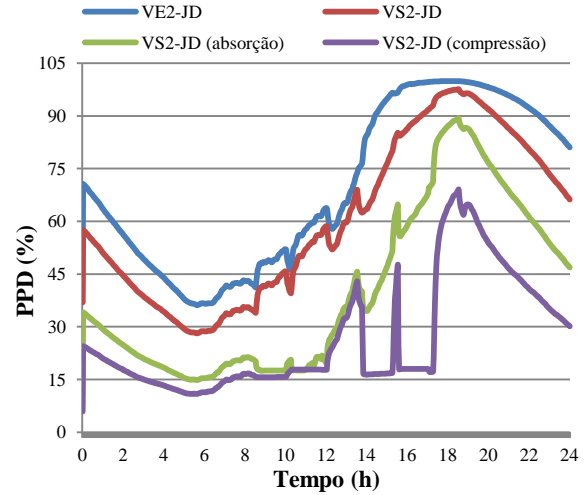


Figura 5.57 - Comparação do PPD para os sistemas AVAC, Verão, Gabinete, Oeste

Gabinete 149 (Sul)

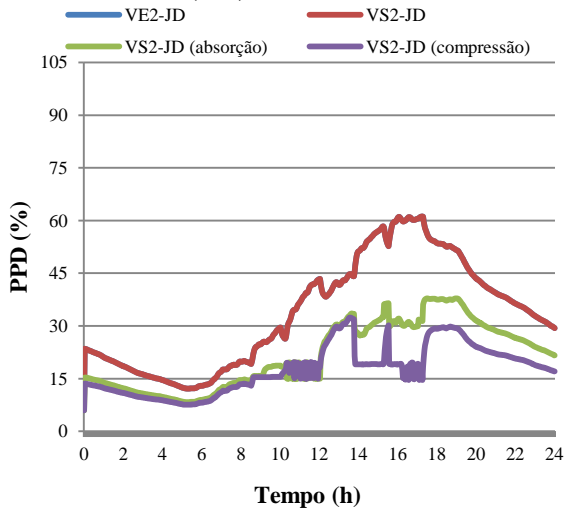


Figura 5.58 - Comparação do PPD para os sistemas AVAC, Verão, Gabinete, Sul.

Gabinete 240 (Norte)

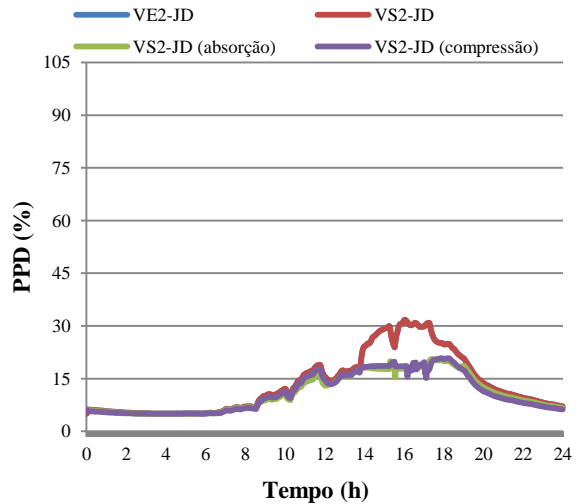


Figura 5.59 - Comparação do PPD para os sistemas AVAC, Verão, Gabinete, Norte.

Como demonstra a tabela 2.5, para uma zona de conforto de categoria C o PPD deve ser inferior a 15%, em todos os gabinetes (fig. 5.56;5.57;5.58;5.59) o sistema composto pelo ciclo de compressão a vapor consegue atingir esse valor ou valores próximos, ao contrário do ciclo de absorção, onde apenas o gabinete 240 (Norte) revela valores de PPD a rondar os 15%.

Tal como foi efetuado para a análise do PMV também na análise do PPD se escolheram os laboratórios 208 (figura 5.60), 61 (figura 5.61), 291 (figura 5.62) e 306 (figura 5.63) para o controlo do conforto térmico.

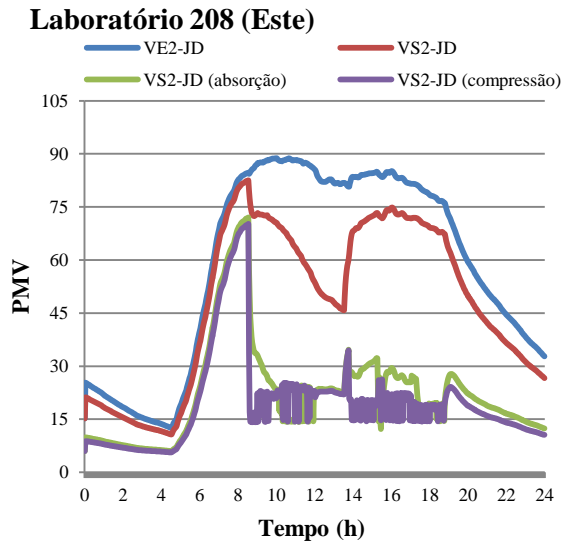


Figura 5.60 - Comparação do PPD para os sistemas AVAC, Verão, Laboratório, Este.

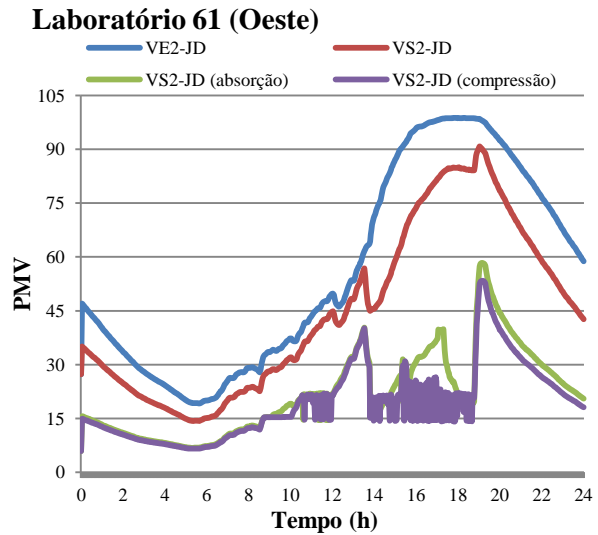


Figura 5.61 - Comparação do PPD para os sistemas AVAC, Verão, Laboratório, Oeste.

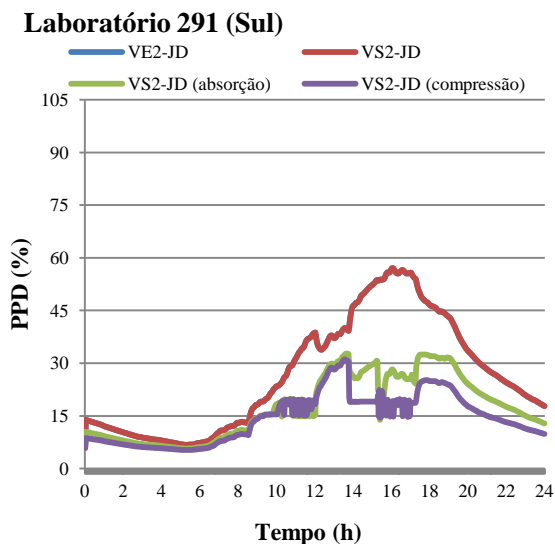


Figura 5.62 - Comparação do PPD para os sistemas AVAC, Verão, Laboratório, Sul

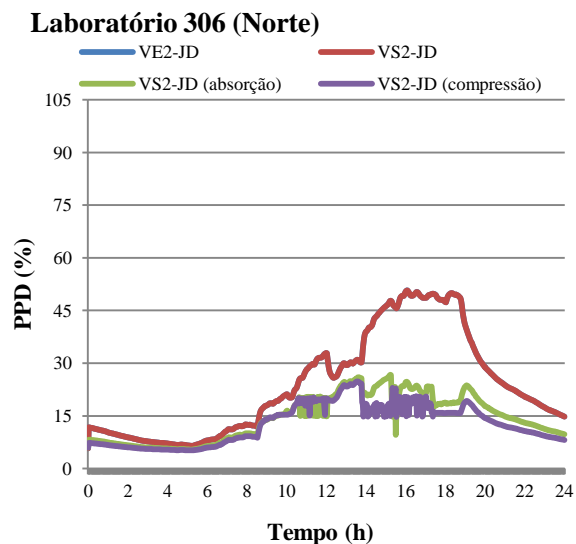


Figura 5.63 - Comparação do PPD para os sistemas AVAC, Verão, Laboratório, Norte

Relativamente aos laboratórios, à semelhança do verificado na análise do PMV, nestes espaços o sistema de absorção consegue resultados mais confortáveis, ao contrário do que acontece nos gabinetes 212 (figura 5.56) e 177 (figura 5.57), em que existe uma grande discrepância do PPD para os dois sistemas (absorção e compressão).

De forma a concluir a escolha do sistema de climatização que confere melhor conforto térmico aos ocupantes, a tabela 5.24 revela as horas de calor sentidas em cada um dos sistemas estudados.

Tabela 5.24 - Horas de Frio para os diferentes sistemas de ventilação e de climatização AVAC

		Sistemas de climatização			
		VE1-JD	VG1-JD	VG1-JD (termoconvectores)	VG1-JD (compressão)
Compartimentos	Horas de frio				
	Bar	54	54	21	13
	Gabinetes	1927	1889	978	633
	Salas de Aula	321	312	133	90
	Laboratórios	1253	1174	410	334
	Secretaria	52	52	32	30
Total		3608	3481	1575	1100

A tabela anterior demonstra claramente as vantagens do sistema de VG1-JD (compressão), o facto de este sistema não estar limitado em termos energéticos permite que haja um melhor controlo das condições internas do edifício. Contudo, deve ser realçado que o estudo não tem em consideração a capacidade adaptativa do ocupante, como já foi verificado (tabela 2.6) essa capacidade do ser humano em adaptar-se as condições faz diminuir consideravelmente a percentagem de pessoas insatisfeitas (PPD).

Como se verifica na análise (tabela 5.24), as horas de calor sentidas pelos ocupantes diminuem com a introdução dos sistemas de climatização AVAC (VG1-JD termocovectores e compressão). Contudo, verifica-se que o sistema auxiliado pela energia solar (VG1-JD termoconvectores) não garante o mesmo conforto que aquele que é sustentado por energia elétrica (VG1-JD compressão).

Inverno

A climatização no inverno, tal como no verão, também é realizada através de termoconvectores, um sistema tem por base o ciclo de compressão a vapor (VG1-JD compressão), e outro utiliza energia térmica proveniente dos coletores (VG1-JD termoconvectores) para a climatização.

Primeiro pretende-se estudar a variação do PMV para gabinetes com diferentes orientações, usando o mesmo método da análise efetuada para a situação de Verão. As figuras seguintes representam o índice PMV sentido pelos ocupantes dos gabinetes orientados a Este (figura 5.64) e a Oeste (figura 5.65).

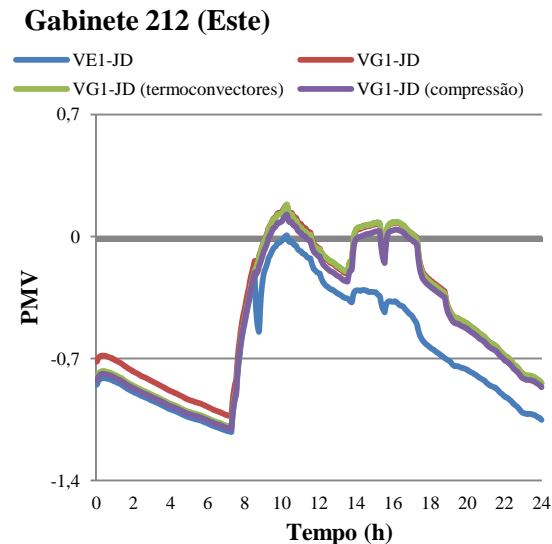


Figura 5.64 - Comparação do PMV para os sistemas AVAC, Inverno, Gabinete, Este

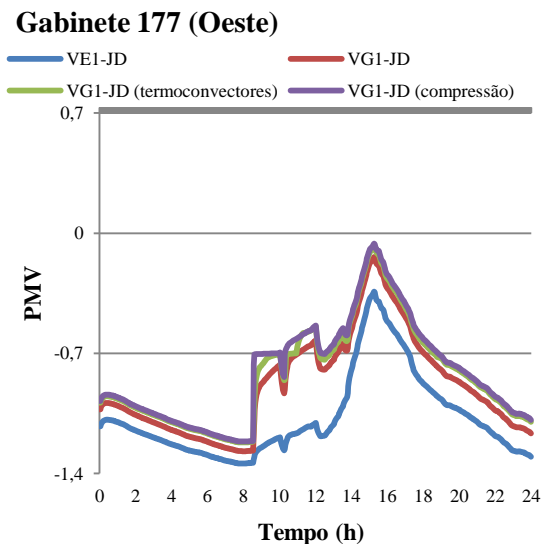


Figura 5.65 - Comparação do PMV para os sistemas AVAC, Inverno, Gabinete, Oeste

As duas figuras representadas acima ilustram dois gabinetes, um com janelas viradas a Este e outro a Oeste, como se verifica em ambos os casos, para as situações sem termoconvectores, a VG1 permite uma melhoria considerável do PMV, ficando este mais próximo de zero. No gabinete 212, o aumento da temperatura verificado pela VG1, resulta na obtenção de um PMV maior que zero, o que revela que os ocupantes nesses momentos sentem calor ao invés de frio. No entanto, num caso real em que os ocupantes estão habilitados de mobilidade poderia ser aberta uma janela, entrando ar frio do exterior, que deste modo iria diminuir a temperatura no interior do compartimento. No gabinete 177, orientado a Oeste, verifica-se que momentaneamente o valor do PMV para o ciclo de compressão a vapor, fica abaixo dos -0,7, isto porque, esses são momentos de intervalo em que o gabinete se encontra desocupado. Mais ainda, verifica-se que devido à sua orientação (figura 5.65), à tarde a VE1 consegue atingir o conforto térmico. Tanto para o gabinete virado a Este como para o virado a Oeste, verifica-se que no momento em que estes são ventilados pelas estufas (CE), tarde e manhã, respetivamente, há uma melhoria das condições de conforto.

Como em ambos os casos (figura 5.64 e 5.65) a VG1 sem climatização já permite uma aproximação ao conforto categoria C (PMV entre os -0,7 e os 0,7), não se verificam grandes alterações com a implementação das duas climatizações (termoconvectores e ciclo de compressão a vapor). Este facto resulta num baixo consumo energético nestes dois gabinetes, as condições já são satisfatórias sem a implementação dos termoconvectores.

Gabinete 149 (Sul)

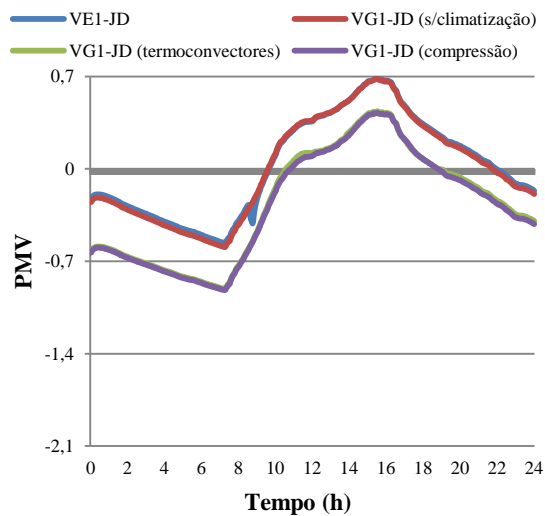


Figura 5.66 - Comparação do PMV para os sistemas AVAC, Inverno, Gabinete, Sul

Gabinete 240 (Norte)

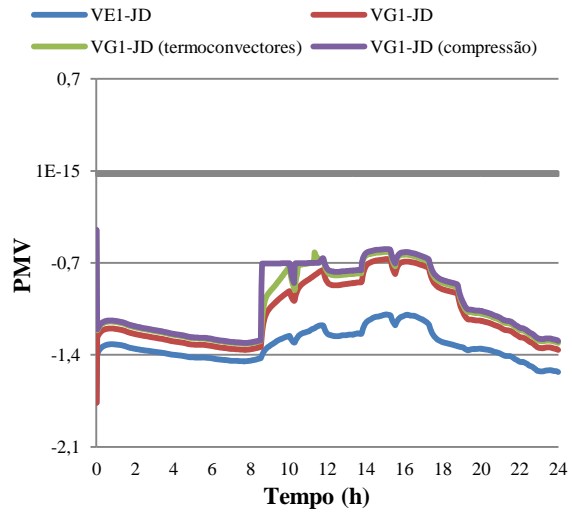


Figura 5.67 - Comparação do PMV para os sistemas AVAC, Inverno, Gabinete, Norte

Analisando os resultados obtidos para o gabinete virado a Sul (figura 5.66), verifica-se que há conforto pelo menos de categoria C ($PMV=0,7$) entre as 8h e as 19h mesmo sem a utilização dos sistemas de climatização com termoconvectores. No entanto, a implementação dos sistemas de climatização AVAC (VG1-JD termoconvectores e compressão) melhoram as condições, principalmente entre as 10 e as 19h, em que o valor de PMV fica mais próximo de zero. Por estar virado a sul e consequentemente ser dos compartimentos mais quentes do edifício, o gabinete 149 não foi alvo de ventilação por parte das estufas na VG1, esse facto é verificado na figura 5.66, o PMV é praticamente o mesmo para a VG1 e VE1.

No que diz respeito ao gabinete 240, a sua localização a norte e a sua orientação a norte, conferem-lhe as características visíveis na figura 5.67. Sendo este um dos compartimentos mais frios do edifício, inseriu-se no esquema de ventilação das estufas, resultando numa melhoria considerável do seu PMV. Tal como nos gabinetes 212 e 177, como o conforto deste se encontra muito próximo da categoria C, não houve grande consumo energético por parte dos sistemas de climatização.

Analisada a situação dos gabinetes, pretende-se agora estudar o comportamento dos laboratórios com os diferentes tipos de climatização. Tal como anteriormente foram comparados quatro laboratórios com orientações distintas (figuras 5.68, 5.69, 5.70 e 5.71).

Laboratório 208 (Este)

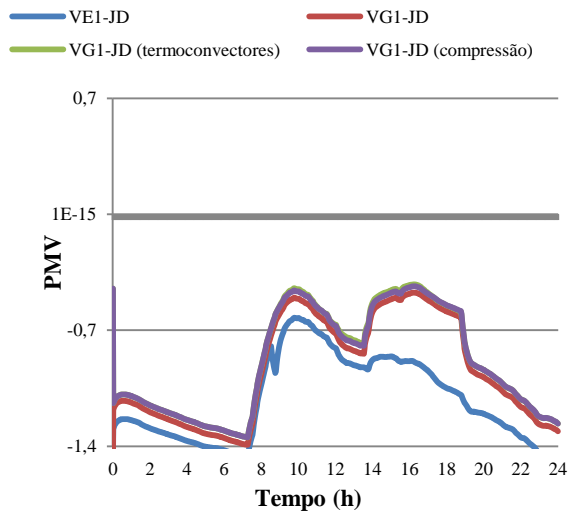


Figura 5.68 - Comparação do PMV para os sistemas AVAC, Inverno, Laboratórios, Este

Laboratório 61 (Oeste)

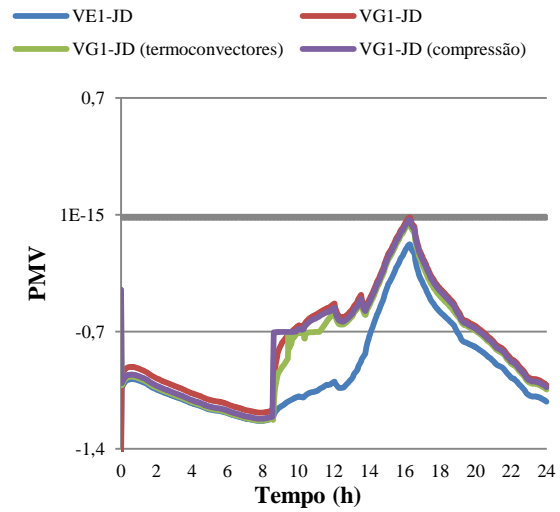


Figura 5.69 - Comparação do PMV para os sistemas AVAC, Inverno, Laboratórios, Oeste

No seguimento do que se concluiu na análise dos gabinetes, também nos laboratórios se verifica o mesmo tipo de comportamento, os dois laboratórios em análise acima são alvo das estufas em VG1, o que lhes confere um conforto já muito próximo do desejado, não havendo assim grande trabalho por parte dos sistemas de climatização. Contudo, analisando os valores de PMV para o ciclo de compressão em ambos os laboratórios (figura 5.68 e 5.69), verifica-se que estes às 8h da manhã estão ainda numa situação de desconforto, este acontecimento é justificado pelo facto de os sistemas de climatização começarem a trabalhar nesse preciso momento, demorando algum tempo até climatizar a sala para os valores de temperatura pretendidos.

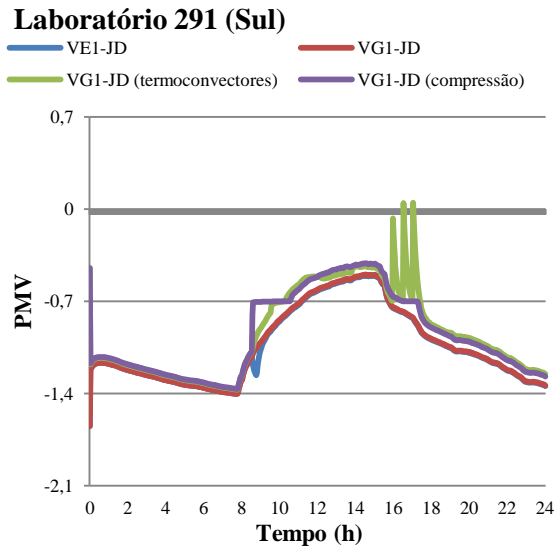


Figura 5.70 - Comparação do PMV para os sistemas AVAC, Inverno, Laboratórios, Sul

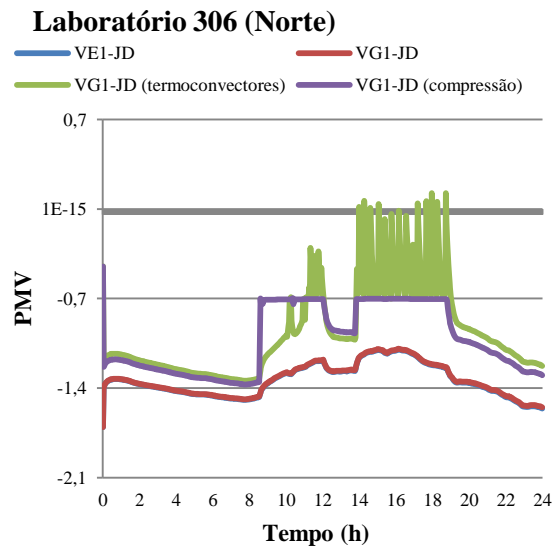


Figura 5.71 - Comparação do PMV para os sistemas AVAC, Inverno, Laboratórios, Norte

Relativamente aos laboratórios virados a Sul (figura 5.70) e a Norte (figura 5.71), verifica-se que o sistema de termoconvectores sustentado pelos coletores solares (VG1-JD termoconvectores) permite uma melhoria considerável do PMV em comparação com o sistema de compressão, isto porque ao contrário do sistema de compressão que está programado para atingir o PMC de -0.7 e estabilizar, o VG1-JD termoconvectores utiliza toda a energia disponível pelos coletores para a climatização, que neste caso permitiu que os laboratórios atingissem uma situação de conforto mais favorável.

Para confirmar as condições de conforto verificadas nas figuras ilustrativas do PMV, analisou-se a percentagem de pessoas insatisfeitas (PPD) para os mesmo compartimentos.

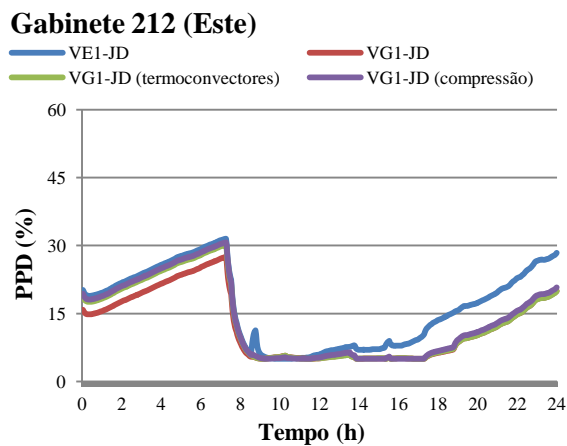


Figura 5.72 - Comparação do PPD para os sistemas AVAC, Inverno, Gabinete, Este

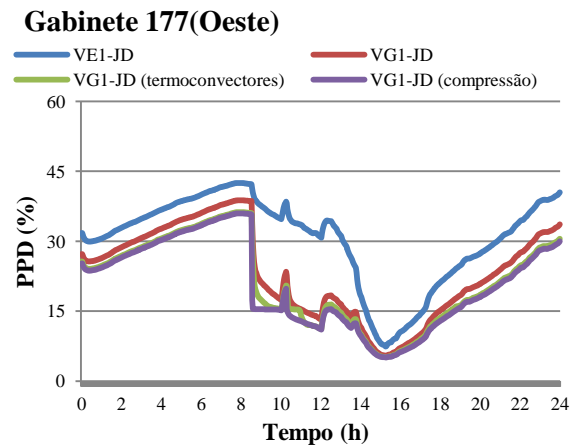


Figura 5.73 - Comparação do PPD para os sistemas AVAC, Inverno, Gabinete Oeste

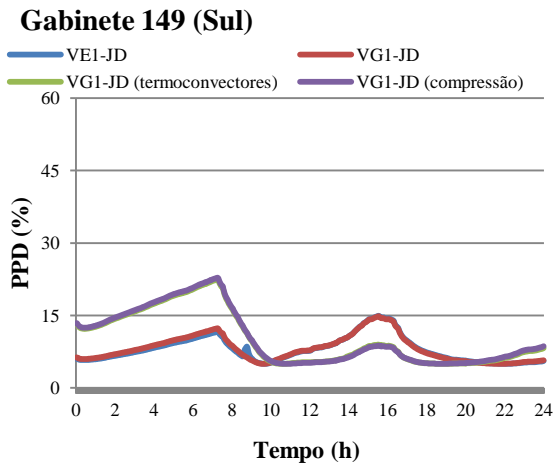


Figura 5.74 - Comparação do PPD para os sistemas AVAC, Inverno, Gabinete, Sul

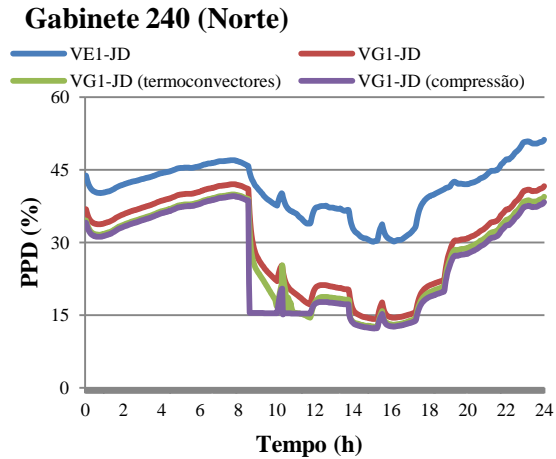


Figura 5.75 - Comparação do PPD para os sistemas AVAC, Inverno, Gabinete, Norte

De encontro ao que se verifica na análise do PMV, também relativamente ao PPD não se verificam grandes discrepâncias entre os sistemas de climatização, ao contrário do que acontece no Verão em que o sistema de compressão a vapor se revela mais eficiente no controlo do conforto térmico. Excetuando o gabinete 240 (figura 5.75) que entre as 8h e as 10h com o sistema VG1-JD termoconvectores se encontra ligeiramente acima dos 15% de PPD, nos restantes gabinetes este garante uma boa percentagem de PPD. Revelando que no inverno o sistema de climatização auxiliado pelos coletores consegue garantir o conforto desejado para o edifício. As figuras seguintes representam a PPD para os laboratórios analisados.

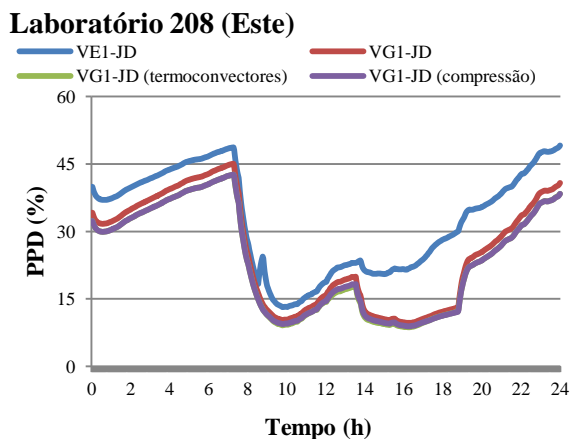


Figura 5.76 - Comparação do PPD para os sistemas AVAC, Inverno, Laboratórios, Este

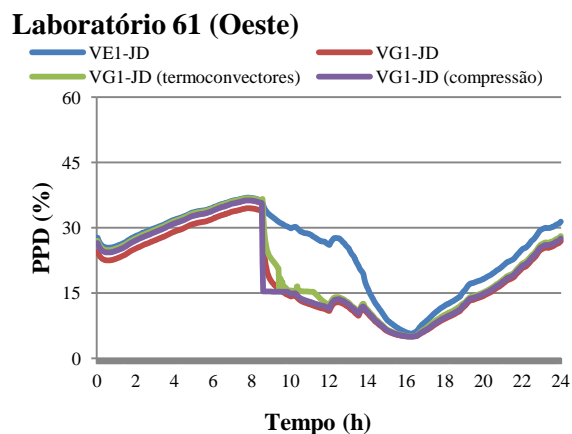


Figura 5.77 - Comparação do PPD para os sistemas AVAC, Inverno, Laboratórios, Oeste

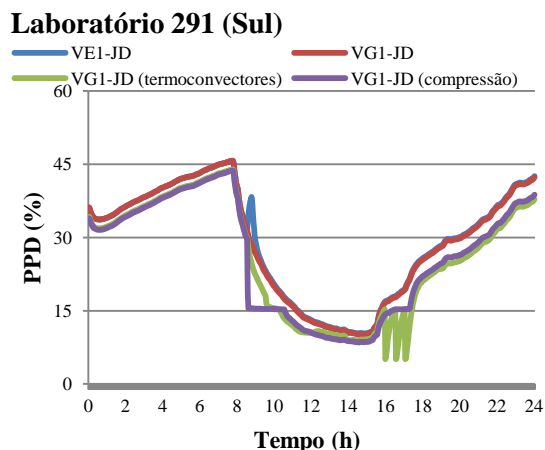


Figura 5.78 - Comparação do PPD para os sistemas AVAC, Inverno, Laboratórios, Sul

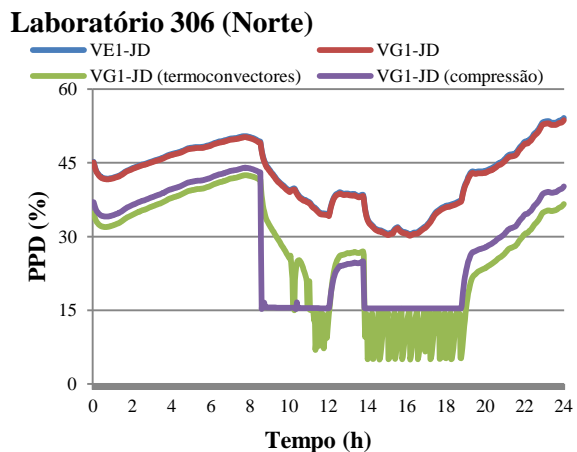


Figura 5.79 - Comparação do PPD para os sistemas AVAC, Inverno, Laboratórios, Norte

Analisando as figuras relativas aos laboratórios, também nestes casos a PPD para ambas as situações de climatização (VG1-JD termoconvectores e VG1-JD compressão) está nos momentos de ocupação muito próximo dos 15%, por vezes até inferior. De forma a compreender qual dos sistemas garante mais conforto, a tabela seguinte compara as horas de frio sentidas pelos ocupantes nos diferentes sistemas.

Tabela 5.25 - Horas de frio dos sistemas de climatização de ventilação abordados no capítulo

		Sistemas de climatização			
		VE1-JD	VG1-JD	VG1-JD (termoconvectores)	VG1-JD (compressão)
Compartimentos	Bar	22	22	9	5
	Gabinetes	867	636	259	270
	Salas de Aula	133	118	39	34
	Laboratórios	471	344	128	136
	Secretaria	36	36	14	19
	Total	1529	1155	448	464

As horas de frio são um bom indicador da eficácia de um sistema de climatização, como se verifica na tabela 5.25 a situação em que é registado menos frio nos espaços ocupados é a VG1-JD com termoconvectores, neste sistema toda a energia produzida pelos coletores é utilizada na climatização do edifício, ao contrário do sistema de compressão a vapor que utiliza apenas a energia necessária para que se atinja o nível de conforto 3 (Inverno, PMV = -0,7). Este facto pode ser verificado nos laboratórios estudados (figuras 5.78 e 5.79), onde o PMV e a PPD com a utilização dos termoconvectores atingem valores mais próximos

dos níveis de conforto A e B (tabela 2.5). Pode-se concluir que no inverno a energia térmica produzida pelos coletores solares é suficiente para a climatização do edifício.

5.5 Análise de consumos energéticos

Na análise de consumos, numa primeira fase analisou-se a energia térmica consumida pelos sistemas de climatização AVAC (tabela 5.26)

Tabela 5.26 - Energia térmica consumida pelos sistemas de climatização AVAC

Temporada	Ventilação	Energia térmica (KWh/dia)
Inverno	VG1-JD (termoconvectores)	504
Inverno	VG1-JD (compressão)	498
Verão	VS1-JD (absorção)	669
Verão	VS1-JD (compressão)	1060

Como se verifica na tabela 5.26, no inverno a energia consumida pelo sistema VG1-JD (termoconvectores) é superior à consumida pelo sistema VG1-JD (compressão), sabendo que os sistemas de compressão, tanto para o verão como para o inverno utilizam a energia necessária para se atingir um conforto térmico de categoria C ($-0,7 < PMV < 0,7$). Conclui-se que no inverno a energia proveniente dos coletores solares, utilizada pelo VG1-JD (termoconvectores), é suficiente para a climatização do edifício. Este facto já tinha sido provado na tabela 5.25, onde se verifica que o sistema de climatização AVAC, baseado na utilização de coletores solares, obteve menos horas de frio que o VG1-JD (compressão)

Pelo contrário, no Verão, a energia consumida pelo VS1-JD (absorção) é inferior ao VS1-JD (compressão). Significa que os coletores solares não conseguiram fornecer energia suficiente aos termoconvectores para a climatização. Estes números revelam o porquê do sistema sustentado pelos coletores não funcionar de forma tão eficaz no Verão. Como se verifica a energia de 669 KWh fornecida pelos coletores é inferior aquela que o sistema realmente necessitava para uma boa climatização, de 1060 KWh, valor consumido pelo sistema VS1-JD (compressão).

No sentido de se compreender a capacidade dos coletores solares em sustentar o edifício a tabela 5.27 relaciona a energia necessária para a climatização com a energia produzida pelos coletores.

Tabela 5.27 - Necessidade energética para a climatização e produção de energia dos coletores

Temporada	Climatização (energia térmica)		
	Necessidade (KWh)	Produção dos coletores (KWh)	Sustentabilidade (%)
Inverno	498	504	101
Verão	1060	669	63

Em relação à temporada de Verão, os coletores só têm capacidade para sustentar 63% da energia térmica necessária para que o edifício seja climatizado eficazmente.

A tabela 5.28 demonstra os resultados obtidos no cálculo do consumo energético relativo à iluminação.

Tabela 5.28 - Consumo energético da iluminação do edifício

Compartmento	Gabinetes	Salas de Aula	Laboratórios	Secretaria	Bar
Energia (KWh)	132,4	39,8	106,5	6,1	8,1
Total = 292,9 KWh/dia em iluminação					

Tal como expectável, os gabinetes e os laboratórios são os compartimentos com maior consumo de energia relativa à iluminação. O cálculo foi conseguido considerando que em todos os momentos de ocupação a iluminação está em funcionamento.

No cálculo do consumo energético inerente à informática considerou-se o uso de 2 computadores por gabinete, sabendo que um computador comum utiliza 300 Watt de energia, como existem 100 gabinetes nos dois edifícios, obteve-se:

$$\frac{300W * 100 \text{ gabinetes} * 2 \text{ computadores}}{1000W/KWh} \times 8h \text{ de trabalho} = 240KWh/dia$$

$$292,9 KWh/dia \text{ em iluminação} + 240 KWh/dia \text{ em computadores} = \\ = 532,9 KWh/dia$$

Assim, obteve-se um total de 532,8 KWh/dia de energia consumida. A tabela 5.29 compara os gastos de energia em iluminação e utilização de computadores com a energia produzida pelas células nas diferentes estações.

Tabela 5.29 - Energia consumida pelo sistema de iluminação e produção das células fotovoltaicas

Temporada	Verão	Inverno
Energia produzida pelas células (KWh)/dia)	190,9	532,7
Energia consumida pela iluminação e computadores (KWh/dia)	532,9	532,9
Sustentabilidade (%)	36	99

Como se verifica, a energia produzida pelas células fotovoltaicas está muito perto de ser suficiente para sustentar os gastos energéticos com a iluminação e informática no inverno. O facto da inclinação das células ser de 90° resulta numa produção de energia maior no inverno do que no verão. Assim, verifica-se que no verão a energia produzida pelas células não é suficiente para sustentar a iluminação. Contudo, o cálculo da energia consumida pela iluminação realizou-se tendo em consideração que a iluminação funciona sempre que há ocupação, ou seja, o valor apresentado é máximo no que diz respeito à iluminação. Porém, determinados compartimentos em determinados momentos do dia têm uma iluminação natural suficiente para os ocupantes, não havendo nesses casos necessidade de iluminação artificial. Neste sentido, no inverno a energia produzida pelas células fotovoltaicas pode ser suficiente para a sustentação dos consumos inerentes à iluminação e informática. Por outro lado, a produção de energia das células foi calculada tendo em consideração condições de céu limpo, o que nem sempre acontece, principalmente no inverno. Podendo em determinados dias a produção de energia ser insuficiente para suportar a iluminação.

6 Dimensionamento

Neste capítulo pretende-se verificar a quantidade de coletores e de células que deveriam ter sido colocadas de forma a atingir a sustentabilidade energética no edifício em estudo. A figura 6.30 demonstra a energia necessária para a climatização e a energia produzida nos coletores solares.

Tabela 6.30 - Energia necessária para a climatização e produção dos coletores

	Produção coletores (energia útil)	Consumo climatização
inverno	504 KWh/dia	498 KWh/dia
verão	669 KWh/dia	1069 KWh/dia
Total	1173 KWh/dia	1567 KWh/dia

Sabendo-se que foram colocados 1693 m² de coletores, através da seguinte equação é possível estimar a quantidade de m² de coletores necessários para a sustentação da climatização.

$$1173 \text{ KWh/dia de energia produzida} \rightarrow 1693 \text{ m}^2 \text{ de coletores solares}$$

$$1567 \text{ KWh/dia de energia necessária} \rightarrow x \text{ m}^2 \text{ de coletores solares}$$

$$\frac{1567 \text{ KWh/dia} * 1693 \text{ m}^2}{1173 \text{ KWh/dia}} = 2261 \text{ m}^2$$

Como demonstram os cálculos, são necessários 2261 m² de coletores para produzirem a energia necessária para a climatização do edifício, No entanto, verifica-se que a razão entre a energia consumida de verão e de inverno e a razão entre a energia produzida de verão e de inverno não é a mesma.

$$\frac{\text{Energia consumida Verão}}{\text{Energia consumida Inverno}} = \frac{1069 \text{ KWh/dia}}{498 \text{ KWh/dia}} = 2,15$$

$$\frac{\text{Energia produzida Verão}}{\text{Energia produzida Inverno}} = \frac{669 \text{ KWh/dia}}{504 \text{ KWh/dia}} = 1,33$$

Os cálculos efetuados demonstram que no verão é necessário 2,15 vezes mais energia que no inverno para a climatização, contudo a energia produzida no verão é apenas 1,33 vezes superior à do inverno. Deste modo, há duas maneiras de compensar esta diferença, uma delas

é aumentar ainda mais o número de coletores, a outra é alterar a inclinação de modo a que favoreça a produção de energia no verão.

Outra alternativa para que a energia produzida pelos coletores no verão seja suficiente, incide na climatização apenas dos compartimentos com maior percentagem de ocupação, isto é, laboratórios e gabinetes. A tabela seguinte demonstra os consumos obtido para estes dois tipos de compartimentos.

Tabela 6.31 – Consumos de energia dos laboratórios e gabinetes no Verão

	Gabinetes	Laboratórios
Consumo climatização (KWh/dia)	227,7	287,1
Total (KWh/dia)	514,9	

Como se verifica pela tabela 6.31 o total de energia térmica consumida pelos gabinetes e laboratórios é de 514,9, relativamente à produção de energia para o verão a tabela 6.30 demonstra que o sistema de coletores considerados consegue produzir 669 KWh/dia. Confirmando-se que no verão, com o sistema de coletores implementados é possível garantir a sustentabilidade energética na climatização de gabinetes e laboratórios.

Relativamente às células fotovoltaicas a tabela seguinte demonstra as energias produzidas pelas mesmas e a energia consumida pelos sistemas de iluminação e informática em funcionamento máximo.

Tabela 6.32 - Energia produzida pelas células fotovoltaicas e energia consumida pelos sistemas de iluminação e informática

Temporada	Energia produzida pelas células (kWh)/dia	Energia consumida pela iluminação e informática (KWh/dia)
Verão	190,9	532,9
Inverno	532,7	532,9
Total	723,6	1065,8

Como se verifica, a energia produzida no Verão está muito aquém do necessário, sabendo-se que foram colocados 542m² de células fotovoltaicas, é possível estimar a quantidade necessária para compensar os consumos calculados.

$$\frac{542 \text{ m}^2 \times 1065,8 \text{ KWh/dia}}{723,6 \text{ KWh/dia}} = 798,32 \text{ m}^2$$

Os cálculos efetuados demonstram que para produzir a energia necessária para a iluminação e informática são necessários aproximadamente 798 m², para além disso, para que as células fotovoltaicas consigam suportar o consumo nas duas estações, a sua inclinação deve ser alterada para os 32° que como já foi demonstrado é ideal para equilibrar a produção de energia nas duas estações.

7 Considerações Finais

Com a realização deste estudo conclui-se que a ventilação tem um papel bastante importante no que diz respeito ao conforto térmico e qualidade do ar no interior de um edifício. Como se verificou pelos resultados obtidos, uma boa estratégia de ventilação permite diminuir consideravelmente as necessidades térmicas, aumentar a qualidade do ar interior e diminuir o consumo energético associado à climatização.

No inverno, o sistema de ventilação de estufas internas resultou num ambiente térmico bastante confortável, isto é, mesmo sem a implementação dos sistemas de climatização AVAC em alguns dos compartimentos analisados verificou-se o conforto térmico desejado ($-0,7 < PMV < 0,7$). Naturalmente que esse facto contribuiu para a redução da energia térmica necessária na climatização, tal como se verificou, a energia produzida pelos coletores solares no inverno era suficiente para a climatização do edifício. Em comparação com o sistema do ciclo de compressão a vapor, que independente da energia consumida estava programado para garantir um ambiente térmico confortável, aferiu-se que a energia térmica consumida pelo sistema de termoconvectores, auxiliado por energia solar é ligeiramente superior, o que demonstra que pode ser garantido o conforto térmico no inverno, mesmo em dias de menor produção energética por parte dos coletores solares.

Deve ser considerado que o *software* calcula a energia produzida pelos coletores tendo em conta a ausência de nebulosidade no céu. Por outro lado, a simulação é realizada para o dia com menos horas de sol do ano, assim, tudo indica que mesmo num dia de alguma nebulosidade, a produção de energia por parte dos coletores solares deve ser suficiente para sustentabilidade na climatização do edifício.

No verão, a estratégia de ventilação subterrânea utilizada não foi tão eficaz como na situação de inverno, o facto de o estudo ser realizado para a região Algarvia decerto que contribui para esse resultado, a região é caracterizada por ter temperaturas amenas no inverno ao contrário do verão onde são atingidas altas temperaturas. Todavia, verificou-se uma melhoria significativa da temperatura com a implementação da ventilação subterrânea, mais ainda com o aumento do caudal de ventilação (VS2). Apesar de tudo, o sistema de climatização baseado no ciclo de absorção, onde se utilizaram coletores solares como fonte de energia, não alcançou o conforto desejado. Em comparação com sistema de climatização baseado no ciclo de compressão a vapor, conclui-se que o sistema suportado pela energia solar (termoconvectores com ciclo de absorção) consegue energia térmica para climatizar

apenas 63% do edifício. Relativamente ao dia considerado no estudo ser o dia com mais horas de sol do ano, por um lado é vantajoso para a produção de energia nos coletores, mas por outro, como a exposição solar do edifício é maior resulta num aumento da temperatura no interior do mesmo.

No que diz respeito à implementação das células fotovoltaica, o facto de estas estarem com um ângulo de 90° em relação à horizontal favoreceu claramente a produção de energia no inverno, verificou-se uma grande diferença de produção de energia entre as estações. Consequentemente, a energia produzida pelas células fotovoltaicas no inverno foi suficiente para sustentar os sistemas de iluminação e informática. Relativamente ao verão, verificou-se que a energia produzida ficou aquém da necessária para suportar os consumos inerentes ao uso dos compartimentos.

Em geral conclui-se que a sustentabilidade energética em edifícios escolares é alcançável no inverno, porém também pode ser alcançável no verão. Como o estudo revela, os coletores solares no verão sustentam 63% da energia térmica necessária para a climatização. Contudo, a implementação de um maior número de coletores solares pode ser suficiente para satisfazer as necessidades térmicas do edifício, tal como foi calculado no capítulo do dimensionamento, um aumento da área de coletores aliado a um ajuste na sua inclinação, pode ser suficiente para atingir a sustentabilidade na climatização das duas estações (verão e inverno). No que diz respeito à iluminação e informática, um aumento do número de células também pode ser suficiente para a sustentação.

Em alternativa, no verão pode-se reduzir a quantidade de compartimentos a serem climatizados, tal como foi demonstrado, gabinete e laboratórios são os espaços com maiores percentagens de ocupação. Tal como se pode verificar comparando as tabelas 6.30 e 6.31, a utilização da energia produzida pelos coletores solares (669KWh/dia) na climatização desses dois tipos compartimentos (514,9 KWh/dia) releva-se suficiente.

Relativamente a projetos futuros, considera-se interessante a realização de um estudo de sustentabilidade energética com a utilização de outras energias renováveis, além da energia solar, a incorporação de superfícies radiantes auxiliados por energia geotérmica superficial poderiam ser uma boa alternativa para a alcançar temperaturas mais baixas no verão, e deste modo diminuir o consumo dos sistemas AVAC.

Referências Bibliográficas

Algoul, M.A., Sulaiman, M.Y., Azmi, B.Z., Wahab, M.Abd. (2005, Agosto). *Review of Materials for solar thermal collectors*. V52(4). Pp 199-206.

Agência Europeia do Ambiente (EEA). (2007). *Europe's environment: the fourth assessment*. Serviço das Publicações Oficiais das Comunidades Europeias. Copenhaga.

Al-Alili, A. (2012). *A hybrid air conditioner driven by a hybrid solar collector*.

Disponível em:

http://drum.lib.umd.edu/bitstream/handle/1903/13508/AlAlili_umd_0117E_13730.pdf;sequence=1

Alison, G., Kwork, Nicholas, B., Rjkovich. (2010). *Addressing Climate change in Comfort Standards*. (pp.18-22)

Antunes, A. R. (2014). *Ecocasa - Qualidade do ar interior: a realidade nacional*. Lisboa: Quercus

APA (2009, Março). *Qualidade do Ar em Espaços Interiores*. Amadora

Disponível em:

https://www.apambiente.pt/_zdata/Divulgacao/Publicacoes/Guias%20e%20Manuais/manual%20QArInt_standard.pdf

ASHRAE Standar. (2003). *Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality*. Atlanta: ANSI.

ASHRAE Standard (2004). *Thermal environmental conditions for human occupancy*. Atlanta.

ASHRAE (s.d.). *ASHRAE Terminology*. Consultado em 10 de Julho, 2016

Disponível em: <https://www.ashrae.org/resources--publications/free-resources/ashrae-terminology>

ASHRAE (1997). *Ventilation Philosophy*.

Disponível em: http://energytrust.org/library/forms/ashrae_62.2_ventilation_orientation.pdf

Baker, N., Standeven, M. (1996). *Thermal Comfort for free-running buildings*. Energy and Buildings. 175-182.

Cena, K., DeDear, R. (2001). Thermal Comfort and behavioural strategies in office buildings located in a hot-arid climate. *Journal of Thermal Biology*.

Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306456501000523>

Charles, K. E. (2003). *Fanger's Thermal Comfort and Draught Models*. Ottawa: Institute for Research in Construction National Research Council of Canada, K1A 0R6.

Disponível em:

<http://www.nascoinc.com/standards/breathable/PO%20Fanger%20Thermal%20Comfort.pdf>

Chatzidiakou, L., Mumovic, D., Dockrell, J. (2014, October). *The effects of thermal Conditions and Indoor Air Quality on Health, Comfort and Cognitive Performance of Students*. Londres: The Bartlett, UCL. Faculty of the Built Environment UCL. Institute for Environment Design and Engineering.

Disponível em: <https://www.bartlett.ucl.ac.uk/iede/documents/cognitiveperformance-1.pdf>

Chatzidiakou, L., Mumovic, D., Summerfield A. J. (2012). *What do we know about indoor air quality school classrooms? A critical review of the literature*. Intelligent Building International. 37-41.

Chu, K., Chou, S., Yang, W., Yan, J. (2013). *Applied Energy*. Elsevier. 87-104.

Disponível em: www-elsevier.com/locate/apenergy

Conceição, E.Z.E., Lúcio, M.M.J.R. (2006, Julho). *Evaluation of Thermal Comfort in Slightly Warm Ventilated Spaces in Nonuniform Environments*. v12 (3).

Conceição, E.Z.E, Vicente, V.S.R., Lúcio, M.M.J.R. (2008, Março). *Airflow Inside School Buildings Office Compartments with Moderate Environments*. V14 (2).

Conceição, E.Z.E, Vicente, V.S.R., Lúcio, M.M.J.R. (2010). *Numerical simulation of passive and active solar strategies in buildings with complex topology*. Faro

Cooper, R. D., Brager, G., Cooper, D. (1997). *Developing an Adaptive Model of Thermal Comfort and Preference* (Final Report)

Disponível em: <http://www.cbe.berkeley.edu/>

Decreto Lei nº118/2013 de 20 de Agosto do Ministério do Ambiente, Ordenamento do Território e Energia, da Saúde e da Solidariedade, Emprego e Segurança Social. Diário da República: I série, Nº 235.

DeDear, R. (2004). *RP-884Project*. Disponível em: http://aws.mq.edu.au/rp884/ashrae_rp884_home.html

Deng, S., Dai, Y. J., Wanh, R. Z., Zhai, x. q. (2011). *Sustainable Cities and Society*. Elsevier. 152-163.

Disponível em: www-elsevier.com/locate/scs.

DGE (2002, Fevereiro). *Eficiência Energética nos Edifícios*. Direcção Geral de Energia - Ministério da Economia

Direcção-Geral de Energia e Geologia (DGED) (2016). *Energia em Portugal*.

Diffat, S. B., Abu-Zour. (2007). *Solar – Driven Air-Conditioning Cycles: A Review*. *Journal of Engineering Research*. pp48-63

Duarte, P. N. A. (2012, Julho). *Colectores Solares Térmicos – Análise de desempenho térmico de solução tecnológicas no mercado*. Porto: FEUP.

Disponível em: <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/68342/1/000154638.pdf>

Environmental Protection Agency (EPA). (1990). *Ventilation and Air Quality in Offices*.

Disponível em: https://www.epa.gov/sites/production/files/2014-08/documents/ventilation_factsheet.pdf

European Commission. (2012, 10 Fevereiro). *Solar Radiation na GIS*.

Disponível em: <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/solres/solmod1.htm>

Fanger, P. O. (1967). *Calculation of Thermal Comfort introduction of a basic comfort equation*. ASHRAE Transactions.73 (2).

Fanger, P.O. (1972). *Thermal comfort. In: Analysis and applications in environmental engineering*. New York: McGraw-Hill.

- Frota, A. B., Schiffer, S. R. (1987). *Manual do Conforto Térmico*. São Paulo: Studio Nobel
- Hassan, H. Z., Mohamad, A. A. (2012). *A review on solar cold production through absorption technology*. *Renewable and sustainable energy reviews*. 16.5331-5348.
- Hold, T., Pinedo-Pascua, I. (2012). *Photovoltaic Solar Electricity Potential in European Countries*. European Commission.
- Disponível em: http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/cmmaps/eu_cmsaf_opt/PVGIS-EuropeSolarPotential.pdf
- Homes, M. J., Hacker, J. N. (2007). Climate Change, thermal comfort and Energy: Meeting the design challenges of the 21st Century. *Elsevier*. 802-814. Disponível em: www.elsevier.com/locate/enbuild
- Hwang, Y., Reinhard, R., Alili, A. A., Kubo, I. (2008). *Review of Solar Cooling Technologies*. HVAC & Research. 14.
- Hwang, P. L., Chen, M. J., Lin T. P., Ho, M. C. (2009). *Thermal perceptions, general adaptation methods and occupant side about the trade – off between thermal comfort and energy saving in hot humid regions*. *Building and Environment*.
- Ionescu, C., Baram, ., Vlad, G., Necula, H., Badea, A. (2015). *The historical evolution of the energy eficiente buildings*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 49. 243-253.
- ISO 7730 (2005). *Ergonomics of the thermal environment – analytical determination and interpretation of the thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria*.
- Lam, J., Wan, K., Cheung, K. (2009). *Applied Energy*. Elsevier. 933-940.
Disponível em: [www-elsevier.com/locate/apenergy](http://www.elsevier.com/locate/apenergy)
- Lebena, E. P., Costa, J. C. (2007, Janeiro). *Instalações Solares Térmicas*. Lisboa: INETI
- Lin, Z., Deng, S. (2008). *Study on the thermal comfort in sleeping environments in the subtropics – developing a thermal comfort model for sleeping environments*. *Building and Environment* (Vol.43, pp70-80)
- Nicol, F., Pagliano, L. (s.d.). *Allowing for thermal Comfort in Free-running Buildings in the New European Standard EN 15251*.
- Ver data http://www.new-learn.info/about/doc/nicol_free_running_2007.pdf
- Olesen, B. W., Ph, D. (1982). *Technical Review: to advance techniques in Acoustical, Electrical and Mechanical Measurement*. (Vol. 2). Bruel&Kjaer.
- Orosa, J. A. (2009). *Research on general thermal comfort models*. *European Journal of Scientific Research*.

Ozgener, O., Hepbasli, A. (2006). An Economical Analysis on a Solar Greenhouse Intergrated Solar Assisted Geothermal Heat Pump System. *Journal of Energy Resources Technology*. 128(1). 28-34.

Doi: 10.1115/1.212 6984

Parsons, K. C. (2003). *Human Thermal Environments*. (2ª ed). London: Taylor&Francis

Galdino, M.A., Pinho, J.T. (2014, Março). *Sistemas Fotovoltaicos*. Rio de Janeiro.

Disponível em: <http://www.portal-energia.com/downloads/livro-manual-de-engenharia-sistemas-fotovoltaicos-2014.pdf>

Raja, I. A., Nicol, J.F., McCartney, K. J. (1998). *Natural ventilated buidings: use of control for changing indoor climate in: Proceedings of the world renewable energy congress*. (Vol V, pp. 391-394). Oxford: Pergamon Press.

Rocha, A. A. S. (2015, Fevereiro). *Desenvolvimento e construção de uma casa modelo com arrefecimento solar térmico*. Porto: FEUP.

Disponível em: https://sigarra.up.pt/fcnaup/en/pub_geral.show_file?pi_gdoc_id=378672

Ruther, R. (2004). *Edifícios Solares Fotovoltaicos*. UFSC/LABSOLAR. 1º Edição. Brasil

Sherman, M. (2009, 3 de Agosto). *Infiltration in ASHRAE's Residential Ventilation Standards*.

Disponível em:

https://buildings.lbl.gov/sites/all/files/infiltration_in_ashraes_residential_ventilation_standards.pdf

Solangi, K. H., Islam, M. R., Saidur, R., Rahim, N. A., Fayaz, H. (2011, Maio). Renewable and Sustainable Energy Reviews. *Elsevier*. 15(4). 2149-2163.

Doi: 10.1016/ 2011 01 007

Ullah, K., Saidur, R., Ping, H., Akikur, R., Shuvo, N. (2013). *A review of Solar Thermal refrigeration and cooling methods*. *Renowable and sustainable Energy Reviews*. 24. 499-513.

World Health Organization. (2009). *Natural Ventilation for infection control in Health-care settings*. Geneva.

Disponível em: http://www.who.int/water_sanitation_health/publications/natural_ventilation.pdf