

Estudo para a optimização dos sistemas de climatização com vista à obtenção de um edifício com baixas necessidades energéticas em climatização

Vasco Manuel de Noronha Rebelo

Dissertação submetida para a obtenção do grau de Mestre em
Energias Sustentáveis

Instituto Superior de Engenharia do Porto
Departamento de Engenharia Mecânica



20 de Novembro de 2012

Relatório da Unidade Curricular de Dissertação/Projecto/Estágio do 2º ano do Mestrado
em Energias Sustentáveis

Candidato: Vasco Rebelo, N° 1040700, 1040700@isep.ipp.pt

Orientação Científica: Isabel Sarmento, isp@isep.ipp.pt

Mestrado em Engenharia Energias Sustentáveis
Departamento de Engenharia Mecânica

Instituto Superior de Engenharia do Porto



20 de Novembro de 2012

Aos meus pais, à Cláudia e à Luana

“A vida da terra depende da vontade humana. A terra será o que os homens nela farão. Nós vivemos, desde agora, este momento histórico decisivo da evolução terrestre.” (Rudolf Steiner)

“A humanidade de hoje tem a habilidade de desenvolver-se de uma forma sustentável, entretanto é preciso garantir as necessidades do presente sem comprometer as habilidades das futuras gerações em encontrar suas próprias necessidades.”

(Agenda 21)

Agradecimentos

Na realização desta dissertação muitas foram as pessoas que me ajudaram, sem as quais este trabalho teria sido sem dúvida muito mais difícil de realizar. A todas elas, queria expressar a minha profunda gratidão.

Não posso deixar de expressar de uma forma particular a minha sentida gratidão:

À Engenheira Isabel Sarmento, minha orientadora, pela sua sabedoria e objectividade, apoio e incentivo ao longo do trabalho desenvolvido nesta tese e sem o qual não teria sido possível a sua conclusão.

À minha namorada Cláudia, pelo amor, incentivo, companheirismo e paciência em todos os momentos.

À minha afilhada Luana, pois como qualquer criança, a sua inocência foi para mim uma fonte de inspiração para a elaboração desta dissertação.

Aos colegas e amigos, Cristóvão Tavares e Octávio Cruz, e pela pronta ajuda sempre que foi necessário.

Ao meu amigo Tiago Gaspar pela ajuda e a apoio prestado, sempre incansável e que auxiliou-me sempre quando foi necessário.

Ao meu amigo Leandro Oliveira, que durante a elaboração da presente tese sempre ajudou quando necessitei, uma palavra de agradecimento queria dar-lhe e como homenagem posto o nome dele aqui, porque também foi o meu companheiro na presente tese e o seu incentivo foi fundamental para a conclusão da mesma.

À minha família, especialmente aos meus pais, por serem uma fonte inesgotável de confiança, pelo apoio, incentivo e compreensão, por me apoiarem sempre em todos os momentos difíceis.

A todos eles queria expressar o meu profundo e sentido agradecimento. a realização deste trabalho foram muitos que contribuíram de alguma forma para a sua concretização.

Resumo

A presente tese tem como principal objectivo abordar o tema da eficiência energética em edifícios, no que se refere aos sistemas de climatização.

O desenvolvimento deste projecto realizou-se em torno dos consumos energéticos dos diferentes sistemas de climatização estudados (e por conseguinte da envolvente do edifício), focando o cumprimento dos requisitos térmico e energéticos das normas vigentes (RCCTE e RSECE) em Portugal, tendo como objectivo identificar os parâmetros com maior impacto e a relação tendencial entre as soluções construtivas e tecnológicas adoptadas, sempre com o horizonte de maximizar a eficiência energética e diminuir a dependência face à energia primária e consequentemente a emissão de gases que provocam o efeito de estufa.

É âmbito desta tese comparar diferentes tipos de sistemas de climatização a nível energético e torná-los os mais eficientes possíveis, para que também se possam tornar monetariamente aliciantes e aumentar o rácio entre benefício/custo. Para tal, numa primeira fase foi feito um estudo térmico da envolvente do edifício, tendo sido utilizado um *software* de simulação energética de edifícios acreditado pela norma *ASHRAE 140-2004* para se poder compreender como o edifício se comportava ao longo do ano, e introduzir algumas correcções na respectiva envolvente, para baixar as potências térmicas/eléctricas dos equipamentos do sistema de AVAC. De seguida foram estudados três sistemas possíveis de climatização para o edifício, de modo a identificar o mais eficiente numa base anual, bem como a possibilidade de combinar o uso de fontes de energia renováveis com o intuito de satisfazer ao máximo as necessidades térmicas do edifício e, ainda, de minimizar o consumo de energia de origem não renovável. Por fim, para avaliar as diferentes potencialidades de cada sistema de climatização estudado, fez-se o respectivo estudo à sua viabilidade económica. Nas considerações finais da presente tese é realizado um estudo aos benefícios que uma possível alteração da arquitectura do edifício pode trazer no aumento da iluminação natural do mesmo integrado com um controlo da iluminação artificial necessária para os diferentes espaços climatizados.

Os resultados obtidos foram comparados entre si e corrigir a **envolvente exterior** reduz os consumos energéticos do edifício em cerca de **11%**. As medidas correctivas propostas no **sistema de climatização base** originam uma redução energética igual a **43%**. A nível **ambiental**, é possível a redução do **número de emissões de CO₂** em cerca de **72.1%**.

Palavras-chave: eficiência energética, sistemas de AVAC, efeito de estufa, *ASHRAE 140-2004*, energias renováveis, arquitectura bioclimática, ventilação natural.

Abstract

This thesis has as main objective to address the issue of energy efficiency in buildings, in the case of Heating, Ventilation and Air Conditioning systems.

The development of this project took place around energy consumption of different HVAC systems studied (and therefore of the building envelope), focusing on meeting the energy and thermal requirements of existing rules (RCCTE and RSECE) in Portugal, aiming to identify the parameters with the highest impact trend and the relationship between the constructive and technological solutions adopted, where the horizon to maximize energy efficiency and decrease dependence the primary energy and hence the emission of gases which causes the greenhouse effect.

The scope of this thesis is to compare different types of HVAC systems at the energy level and make them the most efficient possible, so that can become monetarily attractive and increase the ratio of benefit/cost. For this purpose, initially a thermal study was made of the building, making use of simulation software accredited by the energy of buildings ASHRAE 140-2004 standard, in order to understand how the building behaved throughout the year, and made some corrections in surrounding the same, to lower the thermal/electrical power equipment of the HVAC system. Then were studied three possible HVAC systems for the building to see which would be more efficient throughout the year, as well as the possibility of combining the use of renewable energy sources in order to meet the maximum needs of the building thermal and, also, minimize the power consumption of non-renewable source. Finally, to evaluate the suitability of the different systems, a study was made about economic viability. In the concluding remarks of this thesis is a study of the benefits that a possible change in the building's architecture can bring in increasing the daylighting of the same integrated with a control of artificial lighting required for different air-conditioned spaces.

The results were compared and correct the external envelope reduces energy consumption of the building by about 11%. The corrective measures proposed in HVAC system based energy originate a reduction equal to 43%. The **environmental** level, it's possible to reduce the **number of CO₂ emissions** by approximately **72.1%**.

Key-words: energetic efficiency, HVAC systems, greenhouse effect, ASHRAE 140-2004, renewable energy, bioclimatic architecture, natural ventilation.

Índice

AGRADECIMENTOS.....	IX
RESUMO	XI
ABSTRACT	XIII
ÍNDICE.....	XV
ÍNDICE DE GRÁFICOS	XXI
ÍNDICE DE FIGURAS, QUADROS E FLUXOGRAMAS	XXIII
ÍNDICE DE TABELAS	XXVI
NOMENCLATURAS.....	XXIX
1. INTRODUÇÃO	32
1.1. Enquadramento e caracterização energética em Portugal Continental.....	32
1.2. Enquadramento Legal e a importância do RCCTE e do RSECE no contexto energético português.....	34
1.2.1. <i>Regulamento da Características do Comportamento Térmico dos Edifícios – (Decreto-Lei nº 79/2006 de 4 de Abril), [3]</i>	35
1.2.2. <i>Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios (Decreto-Lei nº80/2006 de 4 de Abril), [2]</i>	35
1.3. Breve referência sobre a Arquitectura Bioclimática e a sua relação com a eficiência energética em edifícios, [9].....	37
1.4. Objectivos da tese	40
1.5. Estrutura da dissertação	41
2. SISTEMAS DE AVAC, [1] [2] [3] [8] [10] [29] [30] [31] [32] [33]	44
2.1. Equipamentos Produtores de Energia Térmica, [8] [10].....	44
2.1.1. <i>A Bomba de Calor</i>	44
2.1.2. <i>Ciclo de refrigeração por absorção</i>	46

2.1.2.1.	<i>Equipamento primário e produtor de energia térmica – O Chiller</i>	47
2.2.	Arrefecimento solar.....	48
2.2.1.	<i>Colector solar térmico aliado ao ciclo de absorção [33]</i>	49
2.3.	Classificação e diferentes tipologias existentes	50
2.3.1.	<i>Classificação dos sistemas</i>	51
2.3.1.1.	<i>Em função da área climatizada</i>	51
2.3.1.2.	<i>Classificação dos sistemas em função do fluido térmico</i>	51
2.3.1.2.1.	<i>Sistemas “tudo-ar”</i>	52
2.3.1.2.1.1.	<i>Sistemas de Volume de Ar Constante (VAC)</i>	52
2.3.1.2.1.2.	<i>Sistemas de Volume de Ar Variável (VAV)</i>	54
2.3.1.2.1.3.	<i>Sistemas de Volume e Temperatura Variável (VVT)</i>	56
2.3.1.2.2.	<i>Sistemas “Ar-Água”</i>	57
2.3.1.2.2.1.	<i>Instalações de Ventiloinvectores com ar primário proveniente directamente da UTA</i> 57	
2.3.1.2.3.	<i>Sistema do tipo “Tudo-Água”</i>	58
2.3.1.2.3.1.	<i>Sistemas “Tudo-Água” do tipo radiante - Pavimento</i>	58
2.3.1.2.3.2.	<i>Sistemas “Tudo-Água” do tipo radiante - Tecto</i>	60
2.3.2.	<i>Sistema de Expansão Directa</i>	62
2.3.2.1.	<i>Sistema de Expansão Directa - Sistema VRV®</i>	62
2.4.	Classificação dos sistemas em função do nível de segurança.....	65
2.5.	Considerações aos sistemas	65
3.	CONFORTO TÉRMICO, [21] [22] [35]	69
3.1.	ISO-7730 – Parâmetros do conforto térmico e metodologia.....	70
3.2.	PMV	71
3.3.	PPD – Desconforto térmico	71
3.4.	Norma ASHRAE 55.....	72

4. IMPORTÂNCIA DA SIMULAÇÃO DINÂMICA NO ESTUDO TÉRMICO/ENERGÉTICO DOS EDIFÍCIOS	74
4.1. Software de simulação dinâmica	75
4.2. <i>Energy Plus 7.0</i> com interface gráfico do <i>Design Builder</i> versão 3, [13] [14]	76
4.3. Programa de simulação para os sistemas solar térmico e fotovoltaico – SolTerm, [34] .	78
4.4. Norma ASHRAE 140 – 2004, [36]	78
5. CASO EM ESTUDO.....	81
5.1. Descrição geral	81
5.2. Caracterização Térmica do Edifício	85
5.2.1. <i>Dados climáticos</i>	85
5.2.2. <i>Envolvente</i>	85
5.2.3. <i>Inércia Térmica</i>	86
5.2.4. <i>Coefficiente de redução das perdas térmicas para locais não aquecidos (τ)</i>	88
5.2.5. <i>Pontes térmicas</i>	88
5.2.6. <i>Verificação dos requisitos regulamentares à envolvente</i>	89
5.3. Condições de funcionamento	91
5.4. Caracterização e condições de funcionamento do sistema de AVAC.....	93
6. “EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DO SISTEMA AVAC E DO EDIFÍCIO – ENQUADRAMENTO DAS MEDIDAS DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA COM OS SISTEMAS PROPOSTOS E O SISTEMA BASE DE CLIMATIZAÇÃO – RESUMO DAS MEDIDAS ADOPTADAS”	95
7. AS FERRAMENTAS DA SIMULAÇÃO ENERGÉTICA DINÂMICA.....	101
7.1. Comparativo entre o <i>Design Builder</i> e o TRACE 700 – Norma ASHRAE 140-2004.....	101
8. OPTIMIZAÇÃO ENERGÉTICA DA ENVOLVENTE	111
8.1. Envolvente opaca	111
8.1.1. <i>Parede Exterior</i>	111
8.1.2. <i>Cobertura</i>	113
8.1.3. <i>Pavimento</i>	114

8.2.	Envolvente não opaca – Vãos envidraçados	115
8.3.	Conjugação das melhorias: envolvente opaca e não opaca	119
9.	O EFEITO DA INÉRCIA TÉRMICA INTERIOR.....	121
10.	ESTUDO PARA A OPTIMIZAÇÃO DOS SISTEMAS DE CLIMATIZAÇÃO	127
10.1.	Sistema AVAC otimizado	127
10.1.1.	<i>Medidas de optimização propostas</i>	<i>127</i>
10.1.2.	<i>Resultados obtidos.....</i>	<i>129</i>
10.1.3.	<i>Análise aos resultados obtidos.....</i>	<i>130</i>
10.1.4.	<i>Considerações à obtenção dos resultados</i>	<i>132</i>
11.	ESTUDO DE NOVOS SISTEMAS DE CLIMATIZAÇÃO	139
11.1.	Sistema VRF “Heat Pump”	139
11.1.1.	<i>Resultados obtidos.....</i>	<i>140</i>
11.1.2.	<i>Análise aos resultados obtidos.....</i>	<i>141</i>
11.1.3.	<i>Considerações à obtenção dos resultados</i>	<i>142</i>
11.2.	Sistema “Green-System”	145
11.2.1.	<i>Resultados obtidos.....</i>	<i>146</i>
11.2.2.	<i>Considerações à obtenção dos resultados</i>	<i>147</i>
12.	CONFORTO TÉRMICO INTERIOR.....	151
12.1.	Norma ISO 7730	151
12.1.1.	<i>Medidas correctivas à envolvente</i>	<i>151</i>
12.1.2.	<i>Sistema AVAC optimizado.....</i>	<i>154</i>
12.2.	ASHRAE 55.....	158
12.2.1.	<i>Sistema VRF “Heat Pump”</i>	<i>158</i>
13.	VIABILIDADE ECONÓMICA	163
13.1.	Envolvente opaca e não opaca.....	164
13.2.	Sistemas AVAC.....	164

14.	CONCLUSÕES	171
15.	PERSPECTIVAS DE TRABALHOS FUTUROS.....	175
16.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	177
	REFERÊNCIAS DOCUMENTAIS	186

Índice de gráficos

Gráfico 1 – Consumos de Energia Final por sector – [Fonte: DGGE em SIDS 2007]	33
Gráfico 1.1 – Consumos de Electricidade por sector – [Fonte: DGGE em SIDS 2007]	33
Gráfico 2 - Correspondência entre a irradiação solar e a carga de arrefecimento /carga de aquecimento numa sala de um seminário em Perpignan (sul de França).....	49
Gráfico 3.1 - Valores obtidos através dos dois <i>softwares</i> de simulação dinâmica para a carga térmica de aquecimento referente à envolvente do edifício.	102
Gráfico 3.2 – Valores obtidos através dos dois <i>softwares</i> de simulação dinâmica para a carga térmica de arrefecimento referente à envolvente do edifício.	102
Gráfico 3.3 – Valores obtidos através dos dois <i>softwares</i> de simulação dinâmica para as necessidades energéticas de aquecimento.	103
Gráfico 3.4 – Valores obtidos através dos dois programas de simulação dinâmica para as necessidades energéticas de arrefecimento.	103
Gráfico 3.5 - Desagregação do consumo eléctrico anual do sistema de climatização base – <i>Design Builder</i>	104
Gráfico 3.6 – Desagregação do consumo eléctrico anual do edifício – <i>Design Builder</i>	104
Gráfico 3.7 – Desagregação do consumo eléctrico anual do edifício – Trace 700	105
Gráfico 4.1 – Necessidades energéticas de aquecimento para os casos a que se remete – [Fonte: ANSI/ASHRAE Standard 140-2007 <i>Building Thermal Envelope and Fabric Load Tests – Design Builder Version 3.0</i>].....	106
Gráfico 4.2 – Necessidades energéticas de arrefecimento para os casos a que se remete – [Fonte: ANSI/ASHRAE Standard 140-2007 <i>Building Thermal Envelope and Fabric Load Tests – Design Builder Version 3.0</i>].....	107
Gráfico 4.3 – Necessidades energéticas de aquecimento para os casos a que se remete – [Fonte: ANSI/ASHRAE Standard 140-2004 Output Form - Modeling Notes TRACE 700 v6.0].....	107
Gráfico 4.4 – Necessidades energéticas de arrefecimento para os casos a que se remete – [Fonte: ANSI/ASHRAE Standard 140-2004 <i>Building Thermal Envelope and Fabric Load Tests – Trace 700 Version 6.0</i>].....	108
Gráfico 5 – Consumo eléctrico anual para diferentes metodologias de cálculo das C.T de arrefecimento.....	109
Gráfico 6 – Consumo eléctrico parcial do edifício (sem iluminação e equipamentos interiores) para as diferentes paredes exteriores estudadas.	112

Gráfico 7 – Consumo eléctrico parcial do edifício (sem iluminação e equipamentos interiores) para as diferentes coberturas estudadas.....	113
Gráfico 7.1 – Correlação entre o consumo energético parcial do edifício e as diferentes coberturas estudadas.	114
Gráfico 8 – Consumo eléctrico parcial do edifício (sem iluminação e equipamentos interiores) para os diferentes pavimentos estudados.....	115
Gráfico 9 – Consumo eléctrico parcial do edifício para diferentes coeficientes de transmissão térmica dos vãos envidraçados.	116
Gráfico 9.1 – Consumo eléctrico parcial do edifício para diferentes tipos de vãos envidraçados, variando o factor solar e o coeficiente de transmissão térmica	117
Gráfico 9.2 – Consumo eléctrico parcial do edifício e desagregação do mesmo para diferentes tipos de vãos envidraçados, variando o factor solar e o coeficiente de transmissão térmica.	118
Gráfico 10 – Consumos eléctricos desagregados e parciais (sistema de AVAC) para distintas classes de inércia térmica para o caso base optimizado na envolvente.	122
Gráfico 11 – Comparação e desagregamento dos consumos eléctricos parciais do sistema optimizado e o sistema base (optimizado envolvente).	130
Gráfico 12 – Comparação e desagregamento dos consumos energéticos globais de AVAC entre o sistema AVAC optimizado e o sistema VRF.	140
Gráfico 13 – Emissões de CO ₂ dos diferentes sistemas de climatização estudados	146
Gráfico 14 – Comparação das necessidades energéticas anuais com recurso a energias de origem fóssil dos diferentes sistemas de climatização.....	147
Gráfico 15 – Comparação do consumo eléctrico anual e desagregado do sistema de AVAC, do caso base com a envolvente optimizada e o mesmo afectado pela análise efectuada ao conforto térmico.....	153
Gráfico 16 – Desagregação do consumo energético total do sistema de AVAC para o sistema de AVAC optimizado e para o mesmo, afectado pela análise ao conforto térmico.....	156
Gráfico 17 – Comparação da temperatura média radiante por estação e por sistema de climatização	159
Gráfico 18 – Desagregação do consumo energético total do sistema de AVAC para o caso optimizado e VRF, afectado pela análise ao conforto térmico.....	161
Gráfico 19.1 e 19.2 – Comparação e distribuição em pesos percentuais do consumo energético do edifício no sistema base (à esquerda) e o sistema optimizado.....	178
Gráfico 20 – Resultados do consumo eléctrico total relativo à iluminação artificial com diferentes tipos de controlo.	181

Índice de figuras, quadros e fluxogramas

Figura 1 - À esquerda a localização dos concelhos com clima I3-V2; à direita carta bioclimática para a cidade de Bragança (I3-V2). [Fonte: Gonçalves, Hélder; Graça, João, 2004, Conceitos Bioclimáticos para os Edifícios em Portugal, INETI].....	38
Quadro 1 – Estratégias Bioclimáticas para o clima I ₃ -V ₂ . [Fonte: Gonçalves, Hélder; Graça, João, 2004, Conceitos Bioclimáticos para os Edifícios em Portugal, INETI, Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação.].....	39
Fluxograma 1 – Comparação entre o sistema de refrigeração a compressão e a absorção (Fonte adaptada: STOECKER, 2002).....	47
Figura 2 - Esquema de uma Unidade de Tratamento de Ar utilizada em sistemas de VAC.....	53
Figura 3 - À esquerda uma instalação típica de um sistema com volume de ar variável. À direita, reguladores de caudal de ar com actuação modulante – VAV terminal units.....	55
Figura 4 - Piso radiante hidráulico (à esquerda) e colector de ida e retorno do circuito hidráulico.....	59
Figura 5 – Distribuição das temperaturas num espaço utilizando radiadores (à esquerda) e distribuição das temperaturas num espaço utilizando piso radiante.....	60
Figura 6 - Curvas de distribuição da temperatura do ar em relação ao corpo humano – Piso radiante.....	60
Figura 7 – Tecto arrefecido.....	61
Figura 8 - Sistema VRV® – Aquecimento e arrefecimento em simultâneo – VRV® “Heat Recovery” [Fonte: Daikin].....	63
Figura 9 – Gráfico do PMV vs PPD – [Fonte: ISO 7730]	72
Figura 10 - Vista de planta do Aproveitamento Hidroeléctrico do Baixo Sabor, Escalão Jusante .	82
Figura 11 – Edifício de Comando da Central Hidroeléctrica de Baixo Sabor, Escalão de Jusante - [Software de modelação: Design Builder Versão 3].....	83
Figura 12 – 1º piso do edifício em estudo (Zona climatizada).....	83
Figura 13 – Corte longitudinal do edifício em estudo.....	84
Figura 14 - Edifício de Comando da Central Hidroeléctrica de Baixo Sabor, Escalão de Jusante, com visualização do percurso solar (dia 21 de Julho às 10 da manhã) - [Software de modelação: Design Builder Versão 3 – Módulo: “Visualize”]	84
Figura 15 - Distribuição das temperaturas ao longo de um dia típico de Verão – Situação de ocupação (segunda a sexta) com os sistemas de AVAC em operação – Caso base com a	

envolvente otimizada, com uma classe de I.T forte para o espaço “Auditório” no dia 17 de Julho.....	123
Figura 16 - Distribuição das temperaturas ao longo de um dia típico de Verão – Situação de desocupação (fim-de-semana) com os sistemas de AVAC desligados – Caso base com a envolvente otimizada, para uma classe de I.T forte para o espaço “Auditório” no dia 21 de Julho.....	123
Figura 17 - Distribuição das temperaturas ao longo de um dia típico de Verão – Situação de ocupação (segunda a sexta) com os sistemas de AVAC em operação – Caso base com a envolvente otimizada para uma classe de I.T fraca para o espaço “Auditório” no dia 17 de Julho.....	124
Figura 18 – Distribuição das temperaturas ao longo de um dia típico de Verão – Situação de desocupação (fim-de-semana) com os sistemas de AVAC desligados – Caso base com a envolvente otimizada para uma classe de I.T fraca para o espaço “Auditório” no dia 21 de Julho.....	124
Figura 19 - Resultados obtidos da simulação dinâmica para a humidade relativa interior, número de horas de desconforto e diferentes índices de conforto para o espaço designado como “Auditório” num dia típico de Inverno (3 de Janeiro).....	133
Figura 20 - Resultados obtidos da simulação dinâmica para a temperatura interior, operativa e radiante para o espaço designado como “Sala de reuniões” num dia típico de Inverno (3 de Janeiro).....	133
Figura 21 - Consumos eléctricos e a recuperação de calor efectuada na UTA, num dia típico de Inverno.....	134
Figura 22 - Resultados obtidos da simulação dinâmica para a temperatura interior, operativa e radiante para o espaço designado como “Sala de reuniões” num dia típico de Verão.....	135
Figura 23 – Comportamento térmico e necessidades de arrefecimento no dia de 2 de Agosto (sexta-feira) para o espaço designado como “Auditório” com os sistemas de AVAC em operação.....	136
Figura 24 - Comportamento térmico e necessidades de arrefecimento no dia de 30 de Julho (fim-de-semana) para o espaço designado como “Auditório” com os sistemas de AVAC desligados.....	137
Figura 25 - Representação do esquema de princípio proposto para simular o sistema VRV® “Heat Pump” utilizando para o efeito uma “Air Loop Unitary Heat Pump – Air to Air” – Software: Design Builder – Módulo: “HVAC Detailed”.....	140
Figura 26 - Resultados obtidos pela simulação dinâmica na opção “Comfort” do software Design Builder, no dia 3 de Janeiro, quinta-feira e com o sistema de AVAC em funcionamento para o espaço designado como “Auditório”.....	142
Figura 27 – Resultados obtidos pela simulação dinâmica na opção “Comfort” do software Design Builder, no dia 13 de Julho, quinta-feira e com o sistema de AVAC em funcionamento para o espaço designado como “Auditório”.....	143

Figura 28 - Resultados obtidos pela simulação dinâmica na opção “ <i>Comfort</i> ” do software <i>Design Builder</i> no dia 3 de Janeiro incluindo o recuperador de calor rotativo, quinta-feira e com o sistema de AVAC em funcionamento para o espaço designado como “Auditório”.	143
Figura 29 - Resultados obtidos pela simulação dinâmica na opção “ <i>Comfort</i> ” do software <i>Design Builder</i> no dia 13 de Julho incluindo o recuperador de calor rotativo, quinta-feira e com o sistema de AVAC em funcionamento para o espaço designado como “Auditório”.	144
Figura 30 – Resultados obtidos pela simulação dinâmica na opção “ <i>Comfort</i> ” do software <i>Design Builder</i> , no dia 23 de Agosto, sexta-feira e com o sistema de AVAC em funcionamento para o espaço designado como “Auditório”	157
Figura 31 – Intervalo de valores recomendado pela norma ASHRAE para a temperatura operativa de acordo com humidade relativa. (Fonte: ASHRAE Fundamentals 2001, capítulo 8, figura 5)	160
Figura 32 - Controlo da iluminação artificial interior com comando por degraus ou “steps” – [Fonte: (http://www.designbuilder.co.uk/programhelp/lighting_control.htm)]	179
Figura 33 – Controlo da iluminação artificial interior com o comando “linear” – [Fonte: (http://www.designbuilder.co.uk/programhelp/_lighting_control.htm)].....	180
Figura 34 - Intensidade luminosa no espaço designado por “Auditório” – (Software: <i>Design Builder</i> , módulo “ <i>Daylighting</i> ”).....	182
Figura 35 - Intensidade luminosa no espaço designado por “Corredor” – (Software: <i>Design Builder</i> , módulo “ <i>Daylighting</i> ”).....	182
Figura 36 – Edifício em estudo com inclusão de dois “dentes-de-serra” - (Software: <i>Design Builder</i>)	183
Figura 37 – Intensidade luminosa no espaço designado por “Auditório” com a inclusão de “dentes-de-serra” na cobertura do edifício (Software: <i>Design Builder</i> , módulo “ <i>Daylighting</i> ”)	184
Figure 38 – Intensidade luminosa no espaço designado por “Corredor” com a inclusão de “dentes-de-serra” na cobertura do edifício (Software: <i>Design Builder</i> , módulo “ <i>Daylighting</i> ”).....	184

Índice de Tabelas

Tabela 1 - PMV e respectivo significado - [Fonte: ISO 7730].....	71
Tabela 2 - Dados climáticos referente ao caso em estudo - [Fonte: RCCTE].....	85
Tabela 3 - Resumo do cálculo dos CTTTP da envolvente.....	86
Tabela 4 - Classes de inércia térmica de acordo com o RCCTE.....	86
Tabela 5 - Valores máximos da massa superficial útil (Msi) em função da localização no edifício dos elementos de construção [Fonte: RCCTE]	87
Tabela 6 - Valores do coeficiente τ para diferentes tipos de tipologia [Fonte:RCCTE]	88
Tabela 7 – Valor do coeficiente de transmissão térmica para a PTP (Pilar)	89
Tabela 8 - Coeficientes de transmissão térmica superficiais máximos admissíveis de elementos opacos [Fonte: RCCTE]	90
Tabela 9 – Factores solares máximos admissíveis de vãos envidraçados com mais de 5% da área útil do espaço que servem [Fonte: RCCTE].....	90
Tabela 10 – Verificação regulamentar do RCCTE (Envolvente opaca).....	90
Tabela 11 – Verificação regulamentar do RCCTE (Envolvente não opaca).....	91
Tabela 12 – Densidade de potência dos equipamentos nos diferentes espaços climatizados.....	91
Tabela 13 – Densidade de potência de iluminação nos diferentes espaços climatizados.....	92
Tabela 14 – Número de ocupantes nos diferentes espaços climatizados.....	92
Tabela 15 - Condições interiores e exteriores de projecto.....	93
Tabela 16 - Temperaturas limite de operação dos Vc's – Gabinetes	93
Tabela 17 - Horário de funcionamento dos Vc's – Gabinetes.....	94
Tabela 18 - Caudais de ar novo dos diferentes equipamentos.....	94
Tabela 19 - Temperaturas limite de operação das UTA e UTAN – Sala de Comando e reuniões e auditório	94
Tabela 20 – Horário de funcionamento da UTA e UTAN	94
Tabela 21 – Desagregação do consumo eléctrico anual do edifício e respectivos desvios entre as 2 simulações	105

Tabela 22 – Parcela correspondente em % na redução energética por elemento construtivo	119
Tabela 23 - Distribuição das temperaturas médias interior (cor-de-laranja) e radiante no Inverno e Verão	152
Tabela 24 - Valor do PPD (%) para cada sala para a estação de aquecimento e arrefecimento....	152
Tabela 25 - Valor revisto do PPD (%) para cada sala para a estação de arrefecimento	153
Tabela 26 - Temperaturas médias radiantes mensais na estação de aquecimento e arrefecimento	155
Tabela 27 - Valores das temperaturas interiores rectificadas e índice PPD (%) para cada sala para a estação de aquecimento e arrefecimento – Caso base optimizado (PPD < 10%).....	155
Tabela 28 - Temperaturas médias radiantes na estação de aquecimento e arrefecimento para o sistema VRF	159
Tabela 29 - Resultados obtidos para os diferentes espaços climatizados para a humidade relativa por estação através do DB e para a temperatura operativa de acordo com a norma ASHRAE 55 para o sistema VRF	160
Tabela 30 - Tabela resumo com a solução óptima por elemento construtivo com o menor pay-back	164
Tabela 31 - Resultados obtidos para sistema solar térmico/caldeira para diferentes áreas de captação solar.	165
Tabela 32 – Investimento inicial necessário para o sistema “Green System”	165
Tabela 33 – <i>Pay-back</i> para o sistema “Green-System” com diferentes possibilidades na área de colectores solares térmicos.....	165
Tabela 34 – Viabilidade económica dos diferentes sistemas de climatizados estudados	167
Tabela 35 - Percentagem de luzes activadas de acordo com o controlo imposto relativamente à intensidade luminosa fornecida pela iluminação natural.....	179

Nomenclaturas, abreviaturas e acrónimos

ADENE – Agência para a Energia

ASHRAE - *American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers*

AVAC – Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado

CE – Comissão Europeia

CIBSE – *Chartered Institution of Building Services Engineers*

CFD – *Computational Fluid Dynamics*

COP – *Coefficient of Performance*

CPC – Colector Solar Parabólico

C.T – Carga Térmica

CTF – *Conduction Transfer Function*

DB – *Design Builder*

DGGE – Direcção Geral de Geologia e Energia

Energy + - *Energy Plus*

EER – *Energy Efficient Ratio*

EPBD – *Energy Performance of Buildings Directive*

ETICS – *External Thermal Insulation Composite System*

Ev – Eficiência de Ventilação

GTC – Gestão Técnica Centralizada

HVAC – *Heating, Ventilation and Air Conditioning*

IEE – Índice de Eficiência Energética

INETI – Instituto Nacional de Engenharia Tecnologia e Inovação

It – inércia térmica

LNEC - Laboratório Nacional de Engenharia Civil

LNEG – Laboratório Nacional de Energia e Geologia

MEL – Materiais Ecologicamente Limpos

M_{pi} – Massa superficial

M_{si} – Massa superficial útil

Mtep – Milhões de toneladas equivalentes de petróleo

NZEB – *Nearly Zero Energy Building*

PMV – *Predicted Mean Vote*

PPD – *Predicted Percentage of Dissatisfied*

PTL – Ponte Térmica Linear

PTP – Ponte Térmica Plana

QAI – Qualidade do Ar Interior

QH – Calor transferido pelo condensador

RCCTE – Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios

R_t – Resistência térmica

RSECE – Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios

SCOP – *Seasonal Coefficient of Performance*

SEER – *Seasonal Energy Efficient Ratio*

SIDS – Sistema de Indicadores de Desenvolvimento Sustentável

U – Coeficiente de transmissibilidade térmica

UE – União Europeia

UPAR – Unidade Produtora de Água Refrigerada

UTA – Unidade de Tratamento de Ar

UTAN – Unidade de Tratamento de Ar Novo

VAC – Volume de Ar Constante

VAV – Volume de Ar Variável

VC - Ventilconvector

VRF – *Volume Refrigerant Flow*

VRV – *Variable Refrigerant Volume*

VTV – Volume e Temperatura Variável

W – Trabalho aplicado pelo compressor

1. Introdução

1.1. Enquadramento e caracterização energética em Portugal Continental

Como é sabido, a poluição ambiental provocada pelo Homem, mais concretamente ou pelo menos o mais enfatizado, as emissões de CO₂ enviadas para a atmosfera, assumem actualmente valores preocupantes, que podem colocar em perigo a própria subsistência ou mesmo em risco a nossa existência num futuro próximo. Sendo uma das maiores ameaças à continuidade da espécie humana, não é de espantar que o Homem sinta ou seja mesmo forçado a mudar o seu paradigma de uso do planeta em que co-habita com outras espécies, criando mecanismos que protejam ou privilegiem mais este, em prol de aspectos e factores de índole ou carácter económico e financeiro, como a Economia por exemplo, ou outros factores que condicionam o frágil equilíbrio que existe entre os interesses económicos e o nosso planeta.

Analisando o que foi dito no parágrafo anterior, é com clara naturalidade que o Homem crie um conjunto de medidas/regras que limitem a produção de gases que provocam o efeito de estufa, surgindo nas últimas décadas um conjunto de regulamentos, protocolos que visam ao cumprimento do mesmo, devendo-se enaltecer o primeiro deles que foi o Protocolo de Quioto.

Transpondo agora para o panorama nacional o que adveio com a subscrição de Portugal ao Protocolo de Quioto, o governo português em 19 de Outubro de 2001 adoptou formalmente o programa E4 (Eficiência Energética e Energias Endógenas) com o objectivo de “... pela promoção da eficiência energética e da valorização das energias endógenas, contribuir para a melhoria da competitividade da economia portuguesa e para a modernização da nossa sociedade, salvaguardando simultaneamente a qualidade de vida das gerações vindouras pela redução de emissões, em particular do CO₂, responsável pelas alterações climáticas”. Como se pode constatar, este programa assume um papel preponderante no cumprimento das metas a qual Portugal se subscreveu ao assinar o Protocolo de Quioto, sendo este programa a base para a criação ou revisões de outros regulamentos, decretos-lei que fomentam e visam o cumprimento das metas para o qual o mesmo foi criado.

Por outro lado, em Janeiro de 2003, foi publicada uma Directiva Europeia relativa ao desempenho energético dos edifícios (EPBD – Energy Performance of Buildings Directive, 2002/91/CE), sendo obrigatório a sua transposição para o quadro legal português.

Em Portugal há cerca de 3,3 milhões de edifícios e de acordo com o Balanço Energético Nacional mais recente, o consumo de energia nos edifícios representa cerca de 30% do consumo de energia final do país, com um consumo total de 3,5 Mtep (milhões de toneladas equivalentes de petróleo). As fontes energéticas correspondentes são muito diversificadas, mas nota-se uma preponderância dos consumos de electricidade que, nos edifícios, representa aproximadamente cerca de 60% dos consumos a nível nacional.

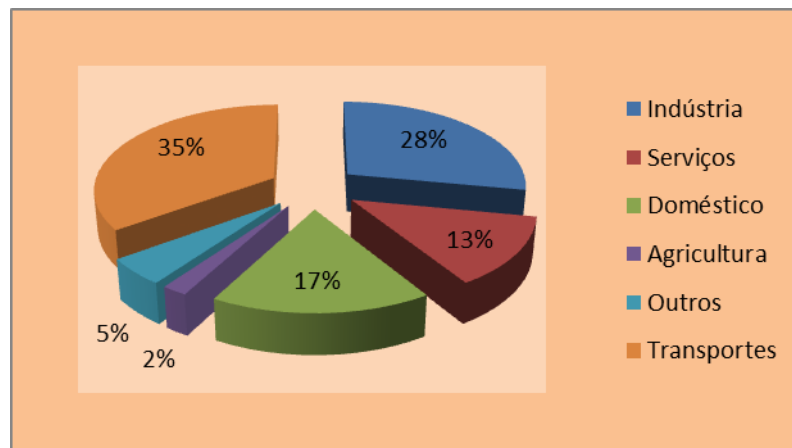


Gráfico 1 – Consumos de Energia Final por sector – [Fonte: DGGE em SIDS 2007]

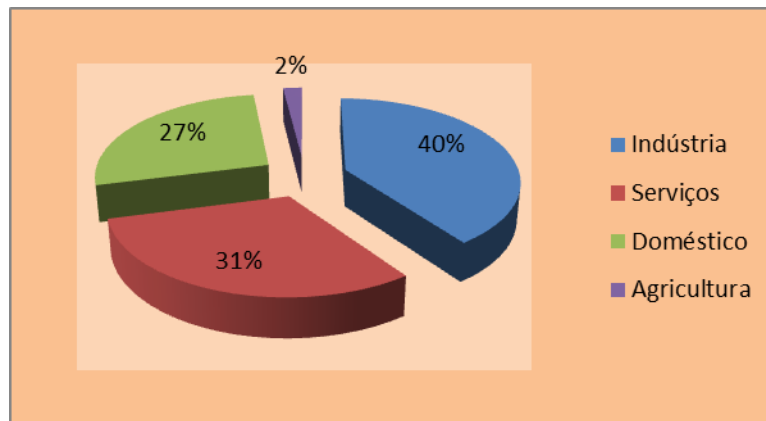


Gráfico 1.1 – Consumos de Electricidade por sector – [Fonte: DGGE em SIDS 2007]

Sendo os edifícios, tanto os residenciais como os de serviços, **responsáveis por mais de 30% do consumo de energia final em Portugal**, o Programa E4 e a legislação que resultou da transposição da EPBD (o SCE, o RCCTE e o RSECE), apontam um vasto leque de medidas que visam essencialmente o fomento da eficiência energética e o uso racional da energia, como por exemplo na preparação de água quente sanitária, iluminação e nos equipamentos dos sistemas de climatização. Entre as várias medidas que o mesmo contempla poder-se-á destacar também a promoção ao **recurso de energias renováveis**, e à **consciencialização da melhoria da envolvente dos edifícios** que com toda certeza e conforme será demonstrado no

capítulo 8 “Optimização energética da Envolvente” condiciona em muito a **potência dos equipamentos de AVAC e por conseguinte nos consumos energéticos dos edifícios.**

Na área dos edifícios, Portugal nas últimas 2 décadas, adoptou regulamentos que limitam o consumo energético dos edifícios de acordo com a sua tipologia, o RCCTE (decreto-lei nº 79/2006 de 4 de Abril) e o RSECE (decreto-lei nº80/2006 de 4 de Abril).

Sucintamente, o âmbito do RCCTE visa garantir que o edifício, através de um conjunto de pressupostos e regras tenha um bom desempenho térmico, enquanto o do RSECE visa fundamentalmente os edifícios com sistemas de climatização, de forma a melhorar a sua eficiência energética, conciliando as mesmas com as actuais exigências no conforto e qualidade do ar interior.

Tais regras, ou se preferirmos regras da boa arte serão continuamente referenciadas ao longo da presente tese e serão também abordadas e analisadas nos sistemas de climatização propostos, bem como a relação e dependência que existe na importância da definição de uma envolvente termicamente cuidada, o que mostrará a interligação entre os dois regulamentos atrás referidos.

Mais importante que o valor do consumo é o ritmo a que aquele vem aumentando. De facto, os dados da DGGE revelam que em 1980 o consumo referente à energia eléctrica dos edifícios de serviços era de cerca de 19%, passados 19 anos a mesma cota no consumo eléctrico já era igual a 31%.

Em suma, face ao crescimento dos consumos energéticos em edifícios de serviços (4 a 7% ao ano), é fundamental promover que os novos edifícios sejam menos consumidores, e que os existentes, em especial aqueles que apresentam um pior desempenho, possam ser forçados ou incentivados a melhorar.

1.2. Enquadramento Legal e a importância do RCCTE e do RSECE no contexto energético português

Conforme foi referido anteriormente, o Programa E4 (Eficiência Energética e Energias Endógenas) e a legislação nacional que decorrem da transposição da directiva europeia EPBD, têm como principais objectivos a promoção e a melhoria da eficiência energética nos edifícios e a utilização racional de energia, bem como incentivar o recurso às energias endógenas.

Os regulamentos RCCTE e RSECE serão alvo de revisão neste ano esperando-se que sejam publicados a breve prazo. De uma forma sumária poderemos dizer que estes dois regulamentos são as ferramentas principais para a verificação, validação e cumprimento das medidas com carácter energético para o edificado português. Nos pontos seguintes será feita uma abordagem sumária e o enquadramento legal dos dois regulamentos.

1.2.1. Regulamento da Características do Comportamento Térmico dos Edifícios – (Decreto-Lei nº 79/2006 de 4 de Abril), [3]

O RCCTE estabelece as regras a observar no projecto térmico de edifícios (vide artigo 1º do RCCTE).

Os edifícios a que se aplica o RCCTE são:

- Edifícios de habitação;
- Edifícios de serviços com área útil < 1000 m² e sem sistemas de climatização ou com sistemas de climatização de potência < 25 kW;
- Grandes intervenções de remodelação ou de alteração na envolvente ou nas instalações de preparação de águas quentes sanitárias das duas tipologias de edifícios referidos no ponto anterior;
- Ampliações de edifícios existentes, exclusivamente na nova área construída.

As excepções estão previstas no n.º 9 do artigo 2º do texto regulamentar e incluem edifícios ou fracções autónomas destinadas a serviços, edifícios utilizados como locais de culto ou **para fins industriais** bem como infra-estruturas militares.

O regulamento aplica-se a cada fracção autónoma de um edifício, ou seja, a cada uma das partes de um edifício que:

- Seja dotada de contador individual de consumo de energia;
- Esteja separada do resto do edifício por uma barreira física contínua e cujo direito de propriedade ou fruição seja transmissível autonomamente.

1.2.2. Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios (Decreto-Lei nº80/2006 de 4 de Abril), [2]

O RSECE tem como principais objectivos estabelecidos:

- **Os requisitos no projecto de novos sistemas de climatização: conforto térmico e qualidade do ar interior / condições de manutenção / utilização racional de energia;**
- **Limites máximos de consumos de energia nos grandes edifícios de serviços:** existentes / projectos de novos edifícios / grandes reabilitações de edifícios com novos sistemas de climatização;
- **Condições de manutenção** dos sistemas de climatização e responsabilidades;
- Condições de monitorização e de auditoria dos edifícios: energia e qualidade do ar interior;
- Requisitos de formação dos técnicos de projecto, instalação e manutenção;

Fazendo uma análise aos objectivos apresentados, é notório, a importância deste regulamento ao não limitar apenas o uso da energia nos sistemas de climatização, bem como uma correcta qualidade do ar interior aliado ao conforto térmico.

E é aplicável a:

- Edifícios ou fracções autónomas não residenciais existentes com área útil de pavimento inferior a 1000 m² ou 500 m² para Centros Comerciais, Hipermercados; Supermercados e Piscinas Cobertas com plano de água superior a 200 m² (artigo 27º);
- Licenciamento de novos edifícios ou fracções autónomas não residenciais com potência instalada superior a 25 kW (artigo 27º);
- Licenciamento de novos edifícios ou fracções autónomas residências com potência instalada superior a 25 kW (artigo 27º);
- Novos sistemas de climatização em edifícios ou fracções autónomas existentes com potência instalada superior a 25 kW (artigo 27º)
- Grandes reabilitações de edifícios de serviços: estimativa de custo superior a 25% do valor do edifício (área útil x 630 euros/m²) envolvente, instalações mecânicas ou demais sistemas energéticos.

Estando excluídos:

- Pequenos edifícios de serviços existentes ou respectivas fracções autónomas sem sistemas de climatização ou com sistemas de climatização de potência instalada igual ou inferior a 25 kW;
- Igrejas e locais de culto;
- **Edifícios industriais e agrícolas;**
- Garagens, armazéns ou similares não climatizados;
- Edifícios em zonas históricas ou classificados;
- Infra-estruturas militares de acesso reservado.

No presente caso em estudo, a verificação do RCCTE e do RSECE encontra-se dispensada, pois o mesmo pertence a uma tipologia de edifícios com cariz ou para fins industriais, não sendo o mesmo dotado de contador individual de consumo de energia e não estando o mesmo separado do resto do edifício por uma barreira continua. No capítulo 5 “Caso em estudo” e, nos vários capítulos dedicados aos resultados, será notório o peso significativo que estes dois regulamentos possuem na limitação e regulação dos consumos energéticos do edifício/fracção em causa. Convém frisar que o caso em estudo não estando no leque dos edifícios que devem verificar os pressupostos e regras do RCCTE e RSECE, para o estudo a que esta tese propõe-se realizar, que é minimizar os consumos energéticos dos sistemas de AVAC, **os mesmos encontram-se presentes e cumpridos nos futuros estudos e análises efectuados.**

No capítulo 5, referente ao “Caso em Estudo” será feita uma análise e o estudo aos parâmetros e requisitos do RCCTE e RSECE (por exemplo definição dos limites da envolvente, verificação dos requisitos mínimos da envolvente opaca e envidraçada, caudais de ar mínimo de ventilação, entre outros) pelo que estes dois regulamentos serão referenciados novamente e **indirectamente estarão sempre presente ao longo do corpo textual da mesma.**

1.3. Breve referência sobre a Arquitectura Bioclimática e a sua relação com a eficiência energética em edifícios, [9]

A importância da arquitectura para ajudar a solucionar os problemas ambientais relacionados com os edifícios é mundialmente reconhecida. Projectar e construir edifícios mais eficientes que “reconciem” o Homem e a natureza é o novo paradigma da arquitectura e da engenharia, conforme foi referido anteriormente na presente tese. Neste sentido surge a arquitectura bioclimática que tem como princípio fundamental a integração construtiva no contexto ambiental, climatérico e biológico da região onde será implementada a construção.

O objectivo primordial da arquitectura bioclimática é promover os inerentes consumos energéticos que um edifício terá no presente e futuro, de uma forma auto-sustentável e o mais eficiente possível no contexto energético e construtivo, quando possível, aproveitando a energia, iluminação natural e outros, que a Natureza nos fornece de uma forma gratuita, potenciando e explorando ao máximo o clima, tomando por exemplo o potenciamento dos ganhos solares na estação de aquecimento e minimizar os mesmos na estação de arrefecimento, ou um correcto posicionamento da vegetação e o seu tipo, se é de folha caduca ou persistente em redor do edifício por exemplo, potenciar técnicas que privilegiem, por exemplo, o arrefecimento evaporativo em redor do edifício com colocação de repuxos em sítios estrategicamente colocados, criando um micro-clima em redor do mesmo, promover a ventilação natural nos espaços, o aproveitamento da inércia térmica interior conforme o clima onde está inserida a construção, **são tudo técnicas que uma boa arquitectura climática pensada e estruturada contempla na concepção de um edifício.**

Deve-se salientar que esta técnica que infelizmente em Portugal tem pouca expressão ou está actualmente um pouco esquecida, será certamente num futuro bastante próximo mais divulgada e utilizada, visto que 2020 está num futuro próximo e, com isso, resultados positivos terão que ser obtidos para o cumprimento das metas energéticas que Portugal subscreveu perante a UE para o respectivo ano.

Como em tudo, a Natureza não nos fornece tudo o que necessitamos no momento em que mais precisamos, principalmente quando analisamos a nível energético, pelo que cabe ao Homem contornar este aspecto e a arquitectura bioclimática, por certo, é uma ferramenta preciosa, mas há que ter a noção que a mesma não é a solução para todos os problemas por si só, pelo que a mesma terá que ser interligada às várias especialidades envolvidas na concepção de um edifício, exigindo um intercâmbio de ideias e uma pluridisciplinariedade maiores, sendo de uma certa forma um dos grandes desafios da mesma perante a contextualidade existente actualmente na construção portuguesa. Pelo que foi exposto anteriormente e pelo conjunto de vantagens que a arquitectura bioclimática pode trazer, fazem com que ela se afirme dia-a-dia, entre as quais e passo a citar algumas de um leque extenso delas, promove edifícios mais eficientes e por conseguinte edifícios com classificações energéticas mais elevadas (classe energética A ou A⁺), promove um aproveitamento da iluminação natural, muitas vezes esquecido na concepção do edifício, e conforme pode ser visualizado e consultado no capítulo intitulado “Considerações Finais” o impacto energético e ambiental que o mesmo acarreta, o fomento ao uso de energias alternativas contribuindo para um modelo sólido de sustentabilidade aliado a uma correcta escolha e utilização dos materiais

utilizados na construção do mesmo com menor impacto ambiental, ou se preferirmos com menor energia incorporada na sua concepção, a fomentação da dispensa dos equipamentos de climatização que tradicionalmente equipam os edifícios, colmatando o custo inicial mais elevado que esta pode acarretar face a um edifício tradicional.

O edifício em estudo na presente tese situa-se no distrito de Bragança, concelho de Torre de Moncorvo, pelo que a nível de divisão climática definido pelo RCCTE, o mesmo está enquadrado na zona $I_3 - V_2$, pelo que de seguida serão ilustrados algumas técnicas bioclimáticas que poderão ser fomentadas e por fim um quadro resumo com medidas que potenciam uma correcta arquitectura bioclimática para a zona definida anteriormente, no entanto esta breve análise será restringida à zona do caso em estudo (Zona $I_3 - V_2$), visto que esta temática não é o âmbito desta tese, pelo que não será feita uma análise detalhada ao mesmo.

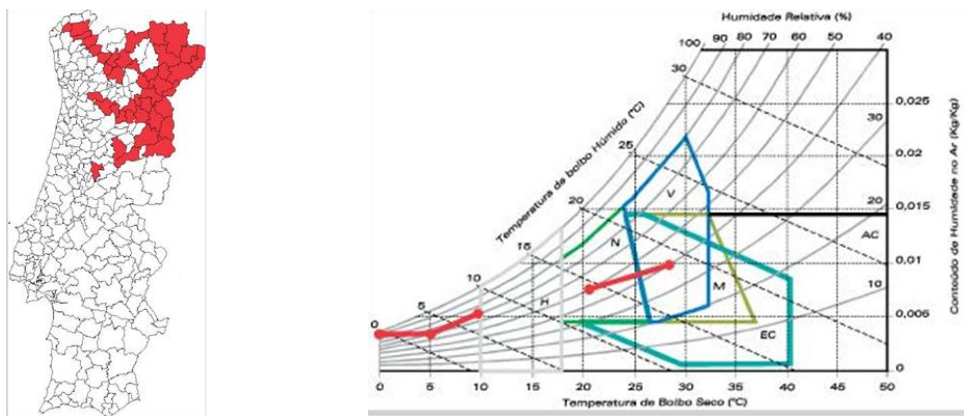





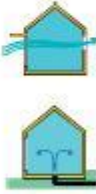



Figura 1 - À esquerda a localização dos concelhos com clima I3-V2; à direita carta bioclimática para a cidade de Bragança (I3-V2). [Fonte: Gonçalves, Hélder; Graça, João, 2004, Conceitos Bioclimáticos para os Edifícios em Portugal, INETI]

Estratégias Bioclimáticas para a zona I_3-V_2

Inverno – Restringir a condução e promover os ganhos solares os quais deverão ser associados a uma boa massa de armazenamento térmico (inércia forte). Os sistemas solares passivos de aquecimento são muito adequados.

Verão – Restringir condução e ganhos solares. Promover uma grande massa de armazenamento térmico (Inércia térmica pesada) e sistemas de arrefecimento evaporativos.

Estação	Estratégias Bioclimáticas	Sistemas Passivos	
Inverno – Estação de Aquecimento	Promover Ganhos Solares.	Todos os sistemas de ganho são adequados para os tipos de edifícios mais convenientes	
	Restringir Perdas por Condução	Isolar Envolvente	
	Promover Inércia Forte	Paredes pesadas com isolamento pelo exterior	
Verão – Estação de Aquecimento	Restringir Ganhos Solares	Sombrear Envidraçados	
	Arrefecimento Evaporativo	Promover ventilação c/ pequenas velocidades de ar através de fontes, espelhos de água, etc.	
	Ventilação	Ventilação transversal (nocturna) Tubos enterrados	
	Promover Inércia Forte	Paredes pesadas com isolamento pelo exterior.	

Quadro 1 – Estratégias Bioclimáticas para o clima I₃-V₂. [Fonte: Gonçalves, Hélder; Graça, João, 2004, Conceitos Bioclimáticos para os Edifícios em Portugal, INETI, Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação.]

1.4. Objectivos da tese

O presente trabalho tem como principais objectivos a optimização dos sistemas de climatização de um pequeno edifício de serviços, o edifício de comando da central hidroeléctrica do Baixo Sabor, escalão de Jusante, com vista à obtenção de um edifício com baixas necessidades energéticas em climatização, tendo para tal, sido avaliados os seguintes pontos:

- Verificação dos pressupostos do RCCTE e RSECE no caso em estudo.
- Simulação energética em vista ao estudo térmico e energético do edifício, com recurso ao *software Design Builder*, acreditado pela norma *ASHRAE 140-2004*.
- Proposta de alteração de alguns parâmetros que influenciam o comportamento térmico do edifício e que levem a uma melhoria energética do mesmo, tais como, a envolvente, iluminação, ventilação, equipamentos e sistemas de climatização com o principal intuito de minimizar as potências eléctricas dos mesmos referentes ao sistema de climatização do edifício.
- Estudo do sistema de climatização proposto para o edifício (sistema base) e comparação energética com outros sistemas de climatização propostos na presente tese.
- Proposta de novos sistemas de climatização com vista à redução e optimização dos consumos energéticos do mesmo, sempre com o objectivo de maximizar a utilização de fontes de energia grátis e renováveis, aumentando assim a eficiência energética dos mesmos.
- Estudo da viabilidade económica dos sistemas de climatização propostos.
- Quantificação do impacto de cada sistema de AVAC analisado, no que respeita às emissões de CO₂ enviadas para a atmosfera, quer no conteúdo de gás refrigerante com potencial de efeito de estufa.
- Estudo dos benefícios/redução nos consumos energéticos do edifício aliado à introdução de dispositivos que permitam a entrada de mais luz solar integrado com um controlo na iluminação artificial, dando sempre primazia à iluminação natural.

1.5. Estrutura da dissertação

No capítulo 1 é apresentado uma síntese geral do **panorama energético a nível nacional, relacionando a importância do RCCTE e RSECE** e o papel preponderante que os mesmos têm, na regulação dos consumos energéticos nos edifícios residenciais e comerciais. É abordado no mesmo capítulo, estratégias que podem ser introduzidas, com o objectivo de proporcionar **uma maior eficiência energética do edifício**, fazendo uso de uma correcta implementação da **Arquitectura Bioclimática**, para a região em causa (I₃-V₂).

No capítulo 2 é feita uma referência aos **equipamentos produtores de energia térmica** estudados na presente tese. É explicado o relacionamento entre o **ciclo de absorção e o arrefecimento solar** e da tipologia necessária que o sistema solar térmico terá que ter, quando é utilizado o ciclo de absorção para produção de água gelada para efeitos de climatização. Complementarmente é comentado os **sistemas de climatização** analisados na presente tese, classificando-os por diferentes tipologias. No fim do capítulo faz-se um relacionamento intrínseco entre os sistemas produtores de energia térmica e os sistemas de AVAC com o RSECE.

No capítulo 3 é comentado os principais parâmetros que influenciam o **conforto térmico**, e a influência que o mesmo pode ter nos **consumos energéticos dos edifícios**. A análise do conforto térmico interior é relacionada com a norma **ISO 7730 e ASHRAE 55**, relacionando as mesmas com o RSECE.

No capítulo 4 é abordado a relação existente e a **importância do software de simulação dinâmica** no contexto energético português, mais concretamente com o RSECE. É descrito de uma forma sumária, o *software* de simulação dinâmica utilizado na presente tese, o *Design Builder* e o *software* utilizado para simular o comportamento energético do sistema solar, o SolTerm. A norma **ASHRAE 140-2004** é também abordada, a mesma que define a **aplicabilidade** de cada *software* de simulação dinâmica e **valida os resultados obtidos**.

No capítulo 5 são apresentados os principais parâmetros construtivos do edifício e dos sistemas de climatização estudados no presente **caso em estudo**. No fim do mesmo capítulo, é descrito os principais pontos estudados e analisados, no sentido de otimizar os consumos energéticos do edifício.

No capítulo 6 é realizado um resumo das propostas de melhorias que irão ser realizadas na presente tese, primeiramente para a envolvente opaca e não opaca do edifício e depois para todos os sistemas de climatização analisados na presente tese.

No capítulo 7 é apresentado os resultados obtidos da comparação efectuada entre 2 *softwares* de simulação dinâmica, o TRACE 700 e o *DesignBuilder*, sendo que, o objectivo fundamental desta comparação é de validar os resultados obtidos do DB, com recurso à **norma ASHRAE 140-2004**, que auxiliou na definição dos intervalos aceitáveis dos resultados obtidos entre ambos os *softwares*. Posteriormente, é realizado um pequeno estudo com o TRACE 700, *software* que permite alterar a metodologia de cálculo das cargas térmicas de arrefecimento,

permitindo verificar e quantificar o impacto que pode acarretar, a utilização de diferentes metodologias de cálculo das C.T nos resultados obtidos.

No capítulo 8 é apresentado os resultados obtidos para a envolvente opaca e não opaca do edifício, com as correcções na envolvente referida no capítulo 6, com o objectivo de minorizar as perdas térmicas pela mesma. Por fim, é apresentada a diferença percentual que existe nos consumos energéticos do edifício, quando a simulação dinâmica é efectuada com as correcções propostas na envolvente, elemento a elemento e em simultâneo.

No capítulo 9 é realizado um estudo à inércia térmica do edifício, fazendo a comparação entre a actual inércia térmica do edifício (forte) e, no caso do mesmo possuir, uma inércia térmica fraca com os mesmos requisitos térmicos. Este estudo visou fundamentalmente conhecer termicamente o edifício em estudo, permitindo esta análise, **quantificar térmica/energicamente**, se é vantajoso ou não, o uso de uma inércia térmica forte no presente caso em estudo.

No capítulo 10 são apresentadas um conjunto de medidas que visam o aumento da eficiência energética do sistema de climatização base, que originaram o **sistema AVAC otimizado**. Os resultados obtidos permitiram **quantificar** as reduções energéticas inerentes à optimização do sistema AVAC base.

No capítulo 11 são apresentados os resultados obtidos (consumos energéticos) para os novos sistemas de climatização propostos, **o sistema VRF e o “Green System”**.

No capítulo 12 é apresentado um estudo relativo ao conforto térmico para cada sistema de climatização, com base nas normas **ISO 7730 e ASHRAE 55**. Este estudo comparou os diferentes sistemas de AVAC, **permitindo quantificar as respectivas reduções/aumentos** nos consumos energéticos de cada sistema de climatização para o mesmo patamar qualitativo, no que concerne ao conforto térmico interior.

No capítulo 13 é demonstrada a **viabilidade económica** sobre as correcções introduzidas na envolvente exterior do edifício. Os sistemas de AVAC são comparados entre si, através de uma análise ao seu *pay-back*, e é realizado complementarmente, um estudo sobre o impacto dos mesmos ao nível das **emissões de CO₂** enviadas para a atmosfera e em relação ao grau de **segurança** dos mesmos.

No capítulo 14 são apresentadas **as conclusões da presente tese, incluindo** o estudo térmico/energético realizado ao edifício, nomeadamente à envolvente exterior do mesmo e sobre os sistemas de climatização estudados.

No capítulo 15 são apresentados um conjunto de trabalhos futuros que podem complementar a presente tese.

No capítulo 16 são feitas as **considerações finais** da presente tese. Fora do âmbito da presente tese, **mas no sentido de valorizar a mesma**, é realizado um pequeno estudo ilustrando a importância de uma correcta **“Arquitectura Bioclimática”**, mais especificamente, no que concerne ao efeito da **iluminação natural**, sendo proposto a introdução de **“dentes de serra”**

que possibilitam o uso da iluminação natural em detrimento da **iluminação artificial**, visando essencialmente reduzir o peso energético desta parcela nos consumos energéticos do edifício.

2. Sistemas de AVAC, [1] [2] [3] [8] [10] [29] [30] [31] [32] [33]

2.1. Equipamentos Produtores de Energia Térmica, [8] [10]

2.1.1. A Bomba de Calor

A bomba de calor, por compressão de um vapor, é um sistema que realiza um ciclo termodinâmico entre duas fontes de energia, uma a baixa temperatura - fonte fria - e a outra a mais alta temperatura - fonte quente - transferindo o calor da fonte fria para a fonte quente graças ao fornecimento de uma certa quantidade de trabalho. Os seus elementos principais são quatro: **evaporador, compressor, condensador e elemento de expansão**. De uma forma simplificada, pode-se dizer que as bombas de calor transferem a energia do exterior presente no ar, no solo ou na água, a uma temperatura mais baixa, para o ar ambiente no interior dos espaços, a uma temperatura de conforto mais elevada - no caso do Inverno - ou transferem a energia do interior dos espaços para os elementos exteriores no caso do Verão.

As bombas de calor operam recuperando calor de uma fonte externa como atrás é referido, o que permite utilizar uma quantidade reduzida de energia para o seu funcionamento, podendo alcançar reduções no consumo de energia de até 80%. Por este motivo, **a bomba de calor pode ser um importante meio** para alcançar o objectivo europeu de realização dos três vintes em 2020, i.e., **a redução de 20% nas emissões dos gases com efeito de estufa, a contribuição de 20% das energias renováveis no share do consumo final e o aumento de 20% na eficiência energética**. No caso português, o objectivo para as energias renováveis aponta para os 31%, pois actualmente já ultrapassou os 20%. Os sistemas de bomba de calor podem ser utilizados nos casos em que a temperatura da água quente pretendida é inferior a 60°C, temperatura esta que permite que seja utilizada em quase todo o tipo de sistemas de AVAC, ou quando se efectua o aquecimento directo do ar.

O desempenho de uma bomba de calor está directamente relacionado com as características da fonte de calor empregue. Uma fonte de calor ideal para bombas de calor tem uma temperatura alta e estável, deve ser também disponível em abundância, não ser corrosiva ou poluída e sua utilização necessitar de poucos investimentos e ter um custo de utilização baixo.

Como fontes de calor disponíveis para uma bomba de calor, temos um conjunto de inúmeras soluções, como por exemplo, o próprio ar exterior, ar de exaustão da ventilação nos edifícios, o solo, a água dos rios, lagos e até do mar e água proveniente de processos industriais e efluentes, constituindo uma óptima solução, pois a mesma caracteriza-se por uma temperatura relativamente alta e constante durante todo o ano. De referir que tradicionalmente a fonte de calor externa empregue nas bombas de calor é o ar exterior, visto que o mesmo é de graça e está amplamente disponível, não sendo necessário dotar as instalações de forma a utilizar essa solução, contribuindo para um custo inicial de investimento mais baixo, quando comparado com outras possíveis fontes externas de calor.

As Bombas de Calor podem ser classificadas quanto ao sistema de aquecimento e quanto aos meios em que vão realizar a troca de calor. Quanto ao sistema de aquecimento as bombas de calor são do tipo não reversíveis e reversíveis, permitindo sempre o mesmo. Uma bomba de calor reversível é um equipamento que permite que o ciclo termodinâmico seja invertido, aquecendo no Inverno e arrefecendo no Verão.

Quanto aos meios em que vão trocar calor, as bombas são definidas pela fonte externa que utilizam e podem ser do tipo Ar/Ar, Ar/Água, Água/Água e geotérmica, sendo esta última nada mais que uma bomba de calor do tipo água/água.

Deve-se referir **que deve ser dada sempre primazia, quando possível, a bombas de calor que utilizem a água como fonte de calor externa**, permitindo que a bomba de calor opere num regime de temperaturas de evaporação estáveis, entre os 5°C e os 10°C, em pleno Inverno.

No caso das bombas de calor que utilizam o ar como fonte energética, a sua capacidade calorífica e o seu coeficiente de desempenho, **COP**, (*Coefficient of Performance*), quociente entre a potência calorífica fornecida pela unidade e a potência eléctrica consumida, ou dito de outra forma, a relação entre o calor transferido (QH) e o trabalho aplicado (W), onde QH é o calor fornecido pelo condensador e W o trabalho consumido no compressor. Através da expressão seguinte, verifica-se que o valor do COP diminui com a diminuição da temperatura do ar exterior, variando o seu valor ao longo da estação de aquecimento, ao contrário do que acontece nas do tipo água-água, em que o COP é praticamente constante na mesma estação.

$$COP = \frac{\text{Débito desejado}}{\text{Fornecimento necessário}} = \frac{QH}{W}$$

Existem dois tipos de COP, **o nominal e o real**. Como o COP real varia com as condições de operação, logo com factores internos (compressor, condensador, evaporador, fluido de trabalho) e externos (temperatura e humidade exterior do ar), é definido um **COP** de referência ou nominal, analisado e estudado em laboratório, em condições padronizadas de teste (por exemplo a *EUROVENT*), para poder ser usado para avaliação dos equipamentos.

No entanto, convém frisar, que, o que realmente interessa reter não é o COP para uma determinada condição de temperatura exterior, mas sim um COP para o período do aquecimento, **SCOP**, (*Seasonal Coefficient Of Performance*), o qual represente o quociente entre a energia fornecida pela unidade, durante todo o período de aquecimento e a energia eléctrica consumida durante o mesmo período. O mesmo caso é aplicado no arrefecimento, em que são definidos o **EER**, (*Energy Efficient Ratio*) e o **SEER**, (*Seasonal Energy Efficient Ratio*). No caso do **EER** e do **SEER** as definições resultam semelhantes às feitas para o **COP** e **SCOP** substituindo as palavras, respectivamente, calorífica e aquecimento por frigorífica e arrefecimento.

Para finalizar, e para ilustrar a eficiência energética de uma bomba de calor, basta realizar uma comparação directa com outros equipamentos, para se verificar que a mesma, é sem dúvida o mais eficiente energeticamente. Fazendo uma simples comparação energética com uma caldeira e uma resistência eléctrica, chegamos à conclusão que **para existir geração de 5 kW de energia térmica** para aos três casos, a resistência eléctrica necessita de 5.20 kW de energia eléctrica, a caldeira de 6.25 kW de energia proveniente de um combustível fóssil (gás natural) e a bomba de calor necessita apenas de 1 kW de energia eléctrica, resultados estes que atestam a sua alta eficiência energética.

2.1.2. Ciclo de refrigeração por absorção

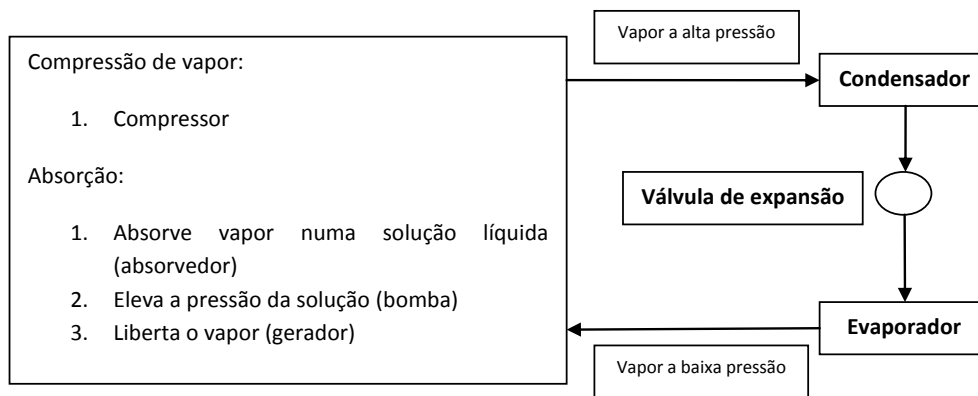
Os sistemas de refrigeração por absorção têm o princípio físico do efeito de refrigeração semelhante ao dos sistemas por compressão: a evaporação de uma massa fluida líquida, a temperatura controlada, em contacto indirecto com o meio a arrefecer. O controlo da temperatura é efectuado pelo controlo da pressão de evaporação.

A diferença entre o ciclo de absorção e o de compressão utilizado pela bomba de calor está na forma como a elevação da pressão (do evaporador para o condensador) do vapor é realizada. Nos sistemas por absorção, o vapor proveniente do evaporador é recebido por um elemento chamado absorvedor (compressor térmico). No absorvedor, o vapor de refrigerante entra em contacto e é absorvido por um absorvente (uma solução líquida). A solução líquida é então bombeada até a pressão de alta (pressão de condensação do vapor), e descarregada no gerador.

No gerador, ela recebe calor de uma fonte externa, a uma temperatura controlada (electricidade, aquecimento solar, etc.) para dissociar o vapor de amónia/brometo de lítio da solução. O vapor é, então, enviado ao condensador, onde retorna e transfere calor com o meio externo, retornando à fase líquida. Posteriormente, é expandido novamente até a pressão de evaporação e retorna ao evaporador, seguindo os mesmos passos de um ciclo por compressão.

A solução resultante no gerador, por sua vez, chamada de solução pobre, tem sua pressão corrigida e retorna ao absorvedor, formando outro ciclo. Desta forma, em sistemas de refrigeração por absorção, o compressor de vapores é substituído por uma solução que 'capta' o vapor proveniente do evaporador, uma bomba, que aumenta a pressão dessa solução líquida, e um permutador de calor que com o auxílio de uma fonte de calor externa, o vapor é

novamente dissociado da solução líquida. A solução com alta concentração de refrigerante, que deixa o absorvedor e é bombeada até o gerador é chamada de solução rica.



Fluxograma 1 – Comparação entre o sistema de refrigeração a compressão e a absorção (Fonte adaptada: STOECKER, 2002)

2.1.2.1. *Equipamento primário e produtor de energia térmica – O Chiller*

Os dois principais tipos de *chiller* são o *chiller* de compressão ou eléctrico e o *chiller* de absorção. Como o presente capítulo é dedicado ao ciclo de absorção, é feita uma referência a este equipamento utilizando o ciclo de absorção.

Conforme referido anteriormente, o ciclo de absorção necessita de uma fonte quente para produzir água gelada. Para tal, o *chiller* utiliza uma solução de um sal (por exemplo brometo de lítio) num processo termoquímico de absorção. De referir, que existem actualmente inúmeros refrigerantes que poderão ser utilizados no ciclo de absorção, no entanto os mais comuns é a água e a amónia, combinados respectivamente com o brometo de lítio e água, formando o par refrigerante-absorvente. Os *chillers* de absorção podem ser divididos em: **chillers de ignição directa e indirecta**. Nos *chillers* de ignição directa temos **os simples e os de duplo efeito**.

Nos chillers de absorção de ignição directa o calor necessário ao processo é obtido queimando directamente um combustível, tipicamente gás natural. **Nos de ignição indirecta** o calor necessário é fornecido na forma de vapor de baixa pressão, água quente ou de um processo de purga quente. Existem essencialmente dois tipos distintos de *chillers* de absorção de ignição indirecta, os sistemas onde o absorvente é o amoníaco (*chiller* para refrigeração) e os sistemas onde o absorvente é o brometo de lítio (*chiller* para climatização).

O *chiller* de absorção estudado na presente tese foi o de simples efeito, pelo que de seguida será feita uma abordagem muito sintética ao mesmo.

A denominação, simples efeito, atribuída ao *chiller*, advém da existência de apenas um gerador onde a fonte quente fornece o calor, ou seja, só existe um patamar de aquecimento. O mesmo combinado com fontes de calor renováveis, **será o eleito** para um dos sistemas de AVAC proposto e estudado na presente tese e que consta no capítulo 5 “Caso em estudo”, sendo

que este equipamento necessita de uma fonte quente que lhe providencie uma temperatura da água a rondar os 90°C.

Ao *chiller* de absorção será interligado um campo de colectores solares que forneçam a energia térmica necessária ao mesmo. A esta técnica de aproveitar a energia solar para efectuar arrefecimento é denominada de “**arrefecimento solar**”. Os resultados e a viabilidade económica (factor fundamental neste tipo de sistema) do sistema de absorção, recorrendo ao uso de energia solar térmica e fotovoltaica, denominado no caso em estudo de “**Green-System**” serão discutidos e analisados nos capítulos dedicado ao caso em estudo e aos resultados da presente tese.

No entanto, gostaria de fazer referência a um par de vantagens e uma desvantagem na utilização deste tipo de sistema e que são decisivas, na pouca procura e utilização deste tipo de equipamento em Portugal, infelizmente. **O consumo de energia eléctrica** dos *chillers* de absorção é muito baixo, em média de 3 a 10% da energia eléctrica de um sistema por compressão, para a operação da bomba de circulação da solução. **Os chillers de absorção são mais benéficos para o ambiente do que os chillers eléctricos** por duas razões, o número de emissões de CO₂ enviadas para a atmosfera é menor e por outro lado não necessita de fluidos refrigerantes. **Combinados com os painéis solares térmicos (fonte de calor)**, tornam-se num sistema bastante atractivo a nível ambiental permitindo o uso de energias endógenas e praticamente sem emissões de CO₂ para atmosfera, **no entanto a nível económico, torna-se num investimento avultado e praticamente incomportável pelo cidadão comum, sendo obrigatória uma análise económica ao mesmo**. Deve-se referir também, que em relação ao *chiller* de compressão, existe um custo de investimento inicial superior nos sistemas de absorção.

2.2. Arrefecimento solar

Neste subcapítulo vai ser abordado o arrefecimento solar, **a base de um dos sistemas em estudo na presente tese, o “Green-System”**.

Utilizar o Sol como fonte de energia para produzir água gelada, parece uma ideia contraditória, no entanto, deixa-o de ser, quando abordamos o tema anterior, o ciclo de absorção. Conforme referido anteriormente, a fonte quente que irá fornecer a energia térmica necessária ao funcionamento do ciclo de absorção, é proveniente dos colectores solares térmicos, funcionando estes como fonte principal de energia.

Desta forma, a utilização no Verão do calor em excesso para arrefecimento térmico solar, oferece a oportunidade **para um aumento da eficiência dos sistemas solares térmicos**, proporcionando também uma oportunidade para os próprios sistemas solares, porque aliados a um equipamento com ciclo de absorção, **garantem uma possível climatização do edifício durante todo o ano**, climatização esta “amiga” do ambiente e com baixos custos energéticos e exploratórios, no entanto com custo iniciais de investimento elevados, o que trava o seu

desenvolvimento. De realçar que quando este sistema (*chiller* e colector solar térmico) é combinado com o solar fotovoltaico, a radiação solar também pode ser convertida em “electricidade solar” pelos sistemas fotovoltaicos, conduzindo aos sistemas convencionais de refrigeração por compressão. No entanto, ao adicionar-se esta vertente o custo inicial do mesmo ainda tornar-se mais inoportável.

No entanto, o facto de existir uma coincidência cronológica, entre a procura e a oferta de energia, sob a forma de irradiação solar, promove o desenvolvimento e divulgação deste tipo de sistemas combinados. O gráfico de barras n.º1 ilustra esta relação, evidenciando a correspondência sazonal entre a irradiação e a carga de arrefecimento a ser dissipada numa divisão.

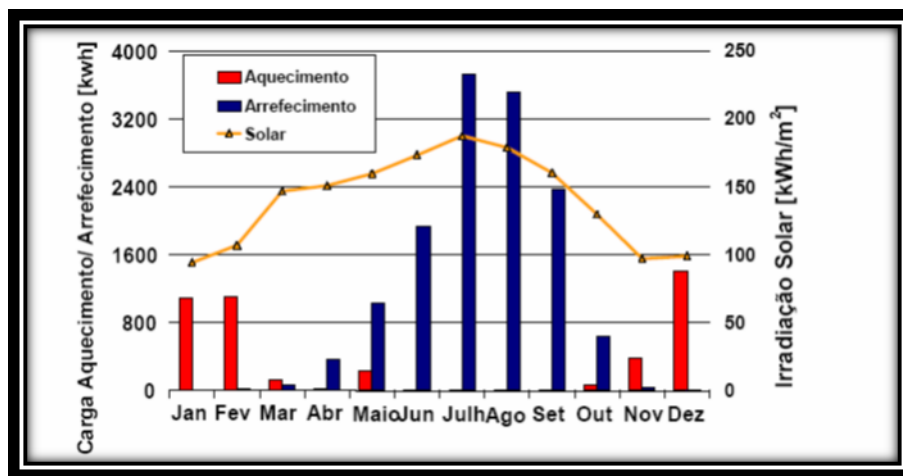


Gráfico 2 - Correspondência entre a irradiação solar e a carga de arrefecimento /carga de aquecimento numa sala de um seminário em Perpignan (sul de França).

Constata-se que existe uma boa correspondência com os requisitos para arrefecimento, sendo a irradiação solar suficiente para cobrir as necessidades de arrefecimento durante grande parte do Verão, sendo desnecessária a instalação de grandes equipamentos, para o armazenamento sazonal de calor.

2.2.1. Colector solar térmico aliado ao ciclo de absorção [33]

Não basta só fornecer energia térmica ao *chiller* de absorção, é necessário que a mesma possua qualidade suficiente. Para tal, os colectores solares planos estão excluídos desde início, quando estes são a única forma de geração de calor, para garantir a água quente necessária para o funcionamento do *chiller* de absorção. Como tal, existem outros tipos de colectores solares térmicos capazes de elevar a temperatura da água próxima dos 90°C, os colectores solares parabólicos (CPC) e os colectores de tubo de vácuo. De seguida é realizada uma breve abordagem aos colectores tubos de vácuo, que foram os utilizados e estudados para a produção de energia térmica necessária a fornecer ao *chiller* de absorção.

Como o nome sugere, **os colectores de tubos de vácuo** permitem reduzir as perdas térmicas num colector solar, em que os tubos de vidro (com absorsores internos) são sujeitos a vácuo.

De forma a eliminar as perdas de calor por convecção, a pressão dentro dos tubos de vidro deve ser pelo menos de 10^{-2} bar, no entanto a maioria dos tubos de vácuo tem pressões internas abaixo dos 10^{-5} bar. Um aumento adicional de evacuação reduz as perdas por condução térmica. Assim, as perdas de calor para a atmosfera são significativamente reduzidas, sendo de realçar, que mesmo com uma temperatura de absorção de 120°C ou maior, os tubos de vidro permanecem frios no seu exterior.

Ao criar vácuo no interior dos tubos, consegue-se apenas minimizar as perdas convectivas, no entanto, as perdas referentes à radiação não se reduzem, visto que as mesmas não dependem do meio em que o colector se encontra inserido. As perdas por radiação e como acontece no comum colector solar plano, são reduzidas com a selecção adequada de bons isolantes térmicos, com valor de emissividades baixas.

Nos colectores de vácuo as placas absorptoras são instaladas como placas absorptoras planas, convexas ou cilíndricas. A forma tubular destes colectores controla através da sua alta compressão as forças que aumentam com o vácuo. Um colector de tubo de vácuo consiste num número de tubos que estão ligados entre si pelo topo através de um distribuidor ou caixa colectora, no qual se localizam o isolamento e as linhas de alimentação e retorno. Existem dois tipos de colectores de tubos de vácuo: **escoamento directo e tubo de aquecimento**. Fundamentalmente, **o colector de vácuo com escoamento directo**, o fluido de transferência de calor é conduzido através de um sistema de tubo-entre-tubo (tubos coaxiais) para a base do absorptor, onde flui para a caixa colectora, aumentando a temperatura do fluido, ou flui através de um tubo em forma de U. **O tubo de aquecimento** nada é mais que a introdução dum revestimento selectivo de metal com propriedades de condutor térmico, ligado a um tubo de aquecimento e colocado dentro do tubo de vácuo, sendo o tubo de aquecimento preenchido com álcool ou água também em vácuo, com o propósito de diminuir a temperatura de evaporação. Sendo assim, o vapor que é criado sobe, transferindo calor por condensação através do permutador de calor para o fluido de transferência de calor. O fluido condensado arrefece e volta a descer para ser aquecido novamente e assim sucessivamente.

Em suma, os colectores de vácuo apresentam uma característica fundamental para a selecção do mesmo, conseguem atingir elevadas temperaturas, possibilitando a utilização em sistemas de AVAC e/ou para produção de vapor. Conforme se pode visualizar no capítulo 13 “Viabilidade Económica”, apresentam como grande desvantagem o seu preço inicial.

2.3. Classificação e diferentes tipologias existentes

Os sistemas de climatização expostos seguidamente são os sistemas mais comuns e instalados em Portugal, sendo que estão englobados nestes, os sistemas de AVAC estudados e analisados na presente tese. No entanto, este capítulo não pretende dar a conhecer todos os sistemas de climatização existentes, mas sim dar ao leitor uma perspectiva global dos sistemas mais importantes e utilizados e enquadrá-los segundo as suas possíveis classificações.

Ao fazer-se referência aos sistemas de AVAC tradicionalmente utilizados e relacioná-los directamente com alguns requisitos obrigatórios do RSECE, tem também o objectivo de referir

o estado da arte no que concerne aos mesmos em Portugal, que foi influenciada nos últimos seis anos pelo RSECE.

Os sistemas de climatização podem ser agrupados da seguinte maneira: quanto à área servida pelo sistema, pelo tipo de fluido térmico utilizado, ou pelos riscos para a segurança dos ocupantes.

2.3.1. Classificação dos sistemas

2.3.1.1. *Em função da área climatizada*

Tendo em conta a área servida pelo sistema de climatização e o local onde é produzida a energia térmica, os sistemas podem ser divididos em dois grupos, **os centralizados e os individuais**.

Um sistema centralizado serve praticamente toda a área de um edifício e o circuito primário, isto é, onde é produzida a energia térmica, encontra-se fisicamente separada num espaço dedicado a acolher os mesmos equipamentos. A distribuição da energia térmica produzida no circuito primário é então distribuída por várias redes de tubagens (circuito secundário), que dependendo da configuração ou tipo de sistema, poderá encaminhar (neste caso quando existe por exemplo VC's) ou não para os equipamentos de climatização.

O sistema individual e como o seu próprio nome indica, serve apenas um espaço que se encontra englobado numa zona a climatizar ou até mesmo, no limiar, o edifício.

Esta divisão tradicional e rígida em dois grupos apresenta alguns problemas. A possibilidade de diferentes concepções para o sistema de climatização é elevada e se na maioria dos casos é possível incluir a instalação num destes dois grupos, nalguns casos a decisão de incluir a instalação num grupo é subjectiva.

Deve ser considerado um grupo adicional, o dos sistemas modulares. Estão neste caso os sistemas de volume refrigerante variável (VRV®) em que existe apenas um circuito, o do fluido frigorigéneo (primário), que vai até aos locais a climatizar. **Não podem ser directamente classificados como sistemas centralizados** mas é incorrecto classificá-los como sistemas unitários. **Um sistema modular é um sistema que serve um conjunto de zonas num edifício e que pode ser facilmente ampliado**, sendo a situação ocorrida para os sistemas VRV®. (L.Roriz)

2.3.1.2. *Classificação dos sistemas em função do fluido térmico*

Os sistemas podem também ser classificados quanto ao fluido térmico (fluido secundário) utilizado. Esta classificação é aplicada principalmente aos sistemas centralizados.

O agrupamento geralmente utilizado considera três tipos base de sistemas: “tudo-ar”, “ar-água” e “tudo-água”.

2.3.1.2.1. *Sistemas “tudo-ar”*

Nos sistemas “tudo-ar”, a energia térmica é levada directamente ao local a climatizar por ar (previamente arrefecido ou aquecido numa Unidade de tratamento de Ar – UTA). Existem duas concepções base: **os de conduta simples** e **os de dupla conduta**.

Para sintetizar, este tipo de sistema é utilizado para diferentes espaços, em que a carga térmica não sofra grandes alterações, devido à sua pouca flexibilidade e onde os diferentes espaços climatizados tenham tipologias de uso, ganhos internos e horário muito semelhantes. Uma forma de ultrapassar esta desvantagem, passa pelo estudo térmico dos diferentes espaços climatizados e englobá-lo por zonas distintas de necessidades térmicas ao longo do ano, englobando cada espaço numa dessas zonas e através de uma ou várias unidades de tratamento de ar consegue-se controlar a temperatura não em cada espaço, mas sim em cada zona. Quando se pretende controlar um espaço em específico, a adopção de equipamentos auxiliares como o caso dos VC’s, permitem a correcção da temperatura interior num dado espaço.

Nos sistemas “tudo-ar”, faz-se uma breve referência aos sistemas de Volume de Ar Constante (VAC), Volume de Ar Variável (VAV) e os de Volume e Temperatura Variável (VTV).

2.3.1.2.1.1. *Sistemas de Volume de Ar Constante (VAC)*

Os Sistemas de Volume de Ar Constante são sistemas onde o ar é tratado previamente numa UTA e distribuído por uma rede de condutas para os diversos espaços a climatizar, como poderá ser visto na figura 2, sendo que todas as divisões, ou mesmo um único espaço recebem o ar no mesmo estado, isto é, à saída da UTA. Este tipo de instalação é utilizado em espaços unitários com volumes consideráveis (como por exemplo um auditório), ou quando utilizados em diferentes divisões que englobam uma zona térmica a tratar, têm a condicionante e conforme referido anteriormente, de os mesmos terem cargas térmica que não sofram grandes alterações entre as divisões e as mesmas, têm que ter tipologias de uso, ganhos internos e horário muito semelhantes.

Quando se trata de um edifício com múltiplas divisões o caudal de ar insuflado deve ser proporcional às cargas térmicas respectivas de cada espaço. Quando se pretende um controlo fino e rigoroso da temperatura e/ou humidades numa dessas divisões, tipicamente um sistema deste tipo não será a opção mais indicada.

O controlo deste tipo de sistema, a GTC (Gestão Técnica Centralizada), pode-se dizer que será uma das mais simples, visto que o controlo completo do sistema depende apenas de sondas de temperatura e humidade colocadas na conduta de retorno das diferentes divisões, obtendo-se assim a temperatura e humidade média dos diferentes espaços climatizados.

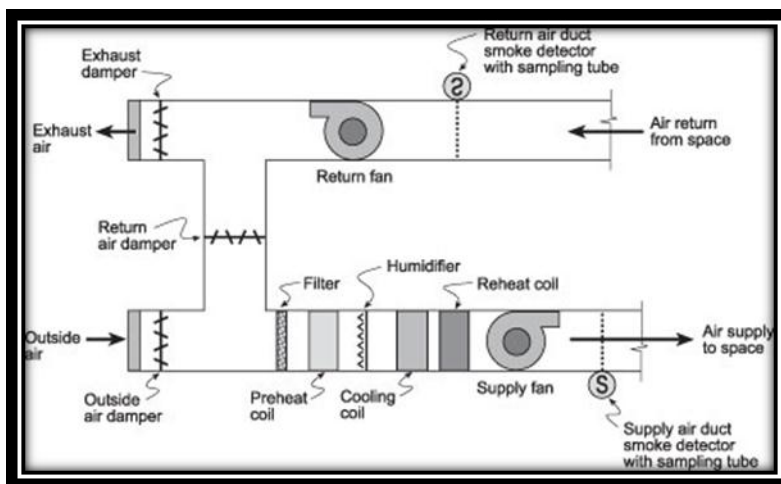


Figura 2 - Esquema de uma Unidade de Tratamento de Ar utilizada em sistemas de VAC.

Para finalizar, deve-se referir que o sistema VAC é tipicamente eficiente, quando não existe o risco de existir aquecimento e arrefecimento em simultâneo, sendo o mesmo utilizado para zonas que tenham a mesma exposição solar, ganhos internos e tipologia, no entanto, o mesmo é bastante ineficiente e problemático no regime de meia-estação, sendo estas épocas do ano caracterizadas normalmente por grandes oscilações nas cargas térmicas no período de funcionamento do sistema. Climas muito severos, quer no Inverno e no Verão, são as situações em que este tipo de sistema tradicionalmente comporta a sua maior eficiência.

Nos casos em que é necessário o controlo de zonas com comportamentos térmicos diferentes, o sistema de VAC pode ser uma solução, no entanto necessita obrigatoriamente de possuir UTA's para cada uma das zonas com condições diferentes, não se conseguindo controlar a temperatura nem humidade por divisão mas dando a hipótese do controlo das mesmas por zona climatizada, situação esta que pode por vezes inviabilizar economicamente este tipo de sistemas.

Uma alternativa é os sistemas que utilizam reaquecimento terminal. Em sistemas de zonas múltiplas, o tratamento do ar é feito nas UTA's e corrigido na própria zona individualmente. Quando o aquecimento terminal é realizado **com recurso directo à energia eléctrica** utilizando o efeito de Joule, alguns cuidados terão que existir **de forma a dar cumprimento ao RSECE**.

A vantagem deste tipo de sistema é a possibilidade que os mesmos conferem de realizar simultaneamente aquecimento e arrefecimento em diferentes espaços.

De uma forma genérica, e tomando como exemplo, a estação de arrefecimento, estes sistemas arrefecem o ar numa UTA, até a uma temperatura que permita que o ar ao ser insuflado no espaço permita retirar a C.T e manter a temperatura interior requerida, no entanto a temperatura do ar de insuflação é definido pelo espaço com a maior carga térmica a retirar, pelo que nos restantes onde a mesma é menor, será necessário fazer um aquecimento adicional ao ar tornando-se um **processo algo ineficiente e conduzindo a desperdícios energéticos**.

Para finalizar este subcapítulo gostaria de referir que **as grandes desvantagens** deste tipo de sistema reside na estação de arrefecimento, visto que e conforme foi dito anteriormente, os espaços que apresentarem menores necessidades de arrefecimento serão prejudicados, sendo necessário posteriormente efectuar um aquecimento adicional ao ar proveniente da UTA, sendo este passo “contranatura” face à temática da eficiência energética porque induz ao consumo de energia superior. Outra desvantagem é o custo acrescido deste tipo de instalação face às instalações de VAC de uma só zona, pois existe um acréscimo de custo com a introdução das baterias de reaquecimento, das respectivas tubagens e da GTC que terá mais pontos de controlo e componentes, encaminhando para um sistema com um custo inicial mais elevado, mas conforme referido anteriormente permite o aquecimento/arrefecimento em simultâneo.

2.3.1.2.1.2. Sistemas de Volume de Ar Variável (VAV)

Nas instalações de Volume de Ar Variável (VAV) a grande diferença para os sistemas de VAC é a variação de caudal de ar insuflado, sendo a temperatura do mesmo constante e a variação de caudal de ar efectuado nas unidades terminais o que permite compensar a carga térmica de cada local. Este tipo de sistemas é adequado para os casos em que as cargas térmicas sofram alterações para os diferentes espaços a climatizar. Em regime de arrefecimento o ar é tratado e insuflado pela UTA num valor pré-fixado para o espaço a climatizar. Se a temperatura ambiente do espaço aumentar, devido por exemplo às fontes internas de calor, o caudal de ar a insuflar aumentará.

Na figura 3 é representado o esquema de princípio de uma instalação típica de VAV. Cada local ou zona a climatizar, dispõe de um termóstato electrónico ou de um controlador com sensor de temperatura que interligado à GTC modulará a abertura dos reguladores de caudal de ar, assim como na válvula de três vias representada na figura seguinte, em função das flutuações da temperatura registadas no interior da sala. De referir, que uma instalação deste tipo o ventilador de extracção que poderá estar incorporado na própria UTA, terá que “acompanhar” as variações de caudal que ocorrerão com o ventilador de insuflação, pois caso contrário poderá ocorrer-se em sobrepensões ou depressões indesejáveis dentro do espaço.

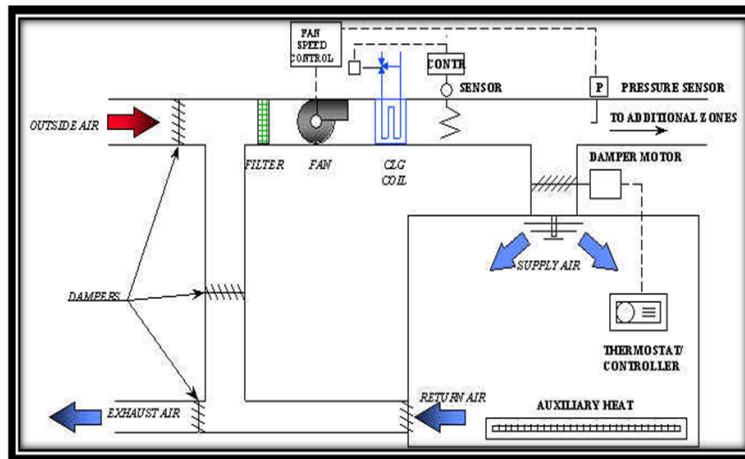


Figura 3 - À esquerda uma instalação típica de um sistema com volume de ar variável. À direita, reguladores de caudal de ar com actuação modulante – VAV terminal units.

A caixa de regulação VAV, ilustrado na figura como “*Damper Motor*”, é controlada através da temperatura ambiente do espaço e por um detector de pressão diferencial instalado no próprio registo.

Para regular os caudais de ar movimentados pela UTA (insuflação e extracção) são instalados na conduta de insuflação detectores de pressão que actuam através da GTC da instalação, regulando a velocidade de rotação dos motores eléctricos e nas electrobombas dos diferentes circuitos hidráulicos que possuam variação de caudal.

Com o exposto no parágrafo anterior, pode dizer-se que **uma das grandes vantagens deste tipo de sistema é a flexibilidade que o mesma apresenta, modelando-se de acordo com as necessidades reais do espaço**, no entanto esta vantagem **induz a uma desvantagem**, visto que os equipamentos mecânicos com interface eléctrica terão que ser todos totalmente controlados e **obrigando a uma GTC muito mais robusta e complexa, traduzindo-se em custos de investimento iniciais mais elevados**, no entanto **a flexibilidade permitida** por este sistema e ajustamento às necessidades efectivas dos diferentes espaços tornam-no num sistema em que **apresenta consumos de energia bastantes menores**, face por exemplo a instalações de VAC que nos dias de hoje em que a eficiência energética é uma prioridade, justifica o grande uso deste tipo de sistema actualmente em Portugal. **O RSECE impondo limites nos consumos energéticos nos edifícios, deu também uma ajuda preciosa para a proliferação dos sistemas VAV.**

Dependendo de instalação para instalação, **pois cada uma é única**, este tipo de instalações operam normalmente com “tudo ar novo”, visto que poderá incorrer-se numa utilização excessiva de ar recirculado comprometendo a entrada de ar novo para os diferentes espaços. Esta situação pode ocorrer quando temos uma UTA a realizar o tratamento do ar com zonas onde a orientação geográfica é oposta. Por exemplo, analisando duas zonas com orientações uma a Norte e outra a Sul e com ganhos internos semelhantes, a zona orientada a Sul terá ganhos pela envolvente opaca e não opaca maiores, pelo que se analisarmos uma UTA com recirculação de ar, a mesma permitirá uma maior percentagem de ar recirculado inerente ao espaço orientado a Sul, o que pode comprometer o caudal mínimo de ar novo nos espaços

orientados a Norte e entrar em incumprimento com o definido no RSECE, no entanto este problema só se coloca, se os espaços que constituem a zona definida e orientada a Norte tiverem um somatório de caudais mínimos de ar novo superiores à da zona orientada a Sul, pelo que terá existir um certo cuidado em verificar o exposto anteriormente na concepção de sistema de VAV.

Na secção dos anexos (anexos C3) da presente tese, são ilustrados e calculados os caudais de ar novo pelo requisito de ocupação e pelo requisito da área, que o RSECE obriga. De referir que a escolha do caudal de ar novo será o maior valor destes dois, penalizado ou não pela eficiência de ventilação (Ev), dependendo do tipo de ventilação efectuada (ventilação *displacement* o $Ev = 1$) e pela existência ou não de Materiais Ecologicamente Limpos (MEL). No capítulo dedicado ao caso em estudo, estes requisitos do RSECE e de carácter obrigatório, são todos considerados para os caudais mínimo de ar novo a movimentar para os diferentes espaços em estudo.

Estes sistemas, assim como os de VAC incorporam normalmente sistemas de recuperação de calor do ar rejeitado para evitar grandes desperdícios de energia.

Em suma, os sistemas de VAV a nível de custo inicial e de manutenção são alternativas mais dispendiosas, no entanto, têm como grande vantagem o baixo consumo energético face aos sistemas de VAC e maior flexibilidade às variações sazonais das cargas térmicas, assistindo-se a **um grande aderência** para este tipo de sistema, por causa das **limitações nos consumos energéticos nos sistemas de AVAC, impostas pelo RSECE**. No entanto, existem outro tipo de instalações/sistemas, que “rivalizam” com o sistema VAV e, que curiosamente têm melhores características de funcionamento que este, maior fiabilidade e custos mais reduzidos, quer na própria instalação, quer na própria manutenção. Ao ler-se a frase anterior, o leitor poderá então questionar: **Porquê o uso de sistemas do tipo VAV, quando temos sistemas mais eficientes e com custos de exploração e manutenção mais baixos?** Bem, essa resposta não poderá ser dada com uma simples leitura neste capítulo, pois existem parâmetros e condicionantes que ainda não foram abordados na presente tese, e que têm um peso fulcral nas instalações de AVAC, quando analisados. No capítulo dedicado aos resultados, seguindo o enquadramento e analisando o mesmo, **fundamentalmente o subcapítulo dedicado inteiramente ao grande “rival” do sistema VAV, o VRV®**, o leitor está em condições de responder à questão anterior. Se o leitor ao fim da leitura da presente dissertação, conseguir responder a esta pergunta, **considero a missão da minha tese cumprida, comprovando que o trabalho foi bem realizado, estruturado e exposto com sucesso ao leitor.**

2.3.1.2.1.3. Sistemas de Volume e Temperatura Variável (VVT)

Nos sistemas de Volume de Ar Variável, existem ainda os **sistemas de Volume e Temperatura Variável (VVT)**. Estes à medida que a carga térmica a dissipar se reduz, permitem a variação de caudal até um limite mínimo a partir do qual a temperatura de insuflação começa a ser reduzida (L.Roriz).

O sistema VVT é uma variante do VAV e permite variar a temperatura e volume do ar tratado em função da temperatura exterior, implicando a instalação de uma GTC ainda mais

sofisticada, no entanto a nível de custo não se traduz num investimento inicial muito grande face aos sistemas de VAV convencionais. O VVT é uma solução económica quando é pretendido para algumas ou todas as zonas um grande controlo das temperaturas interiores. Este tipo de sistema funciona bem para edifícios ou zonas que tenham necessidades de aquecimento/arrefecimento até 90 kW.

2.3.1.2.2. Sistemas “Ar-Água”

Nos sistemas “ar-água” são utilizados simultaneamente o ar e a água como fluidos térmicos. Existem diferentes tipos, devido à forma como é repartida a eliminação da carga térmica pela água e pelo ar. (L.Roriz)

A solução mais frequente é a de (aproximadamente) remover a carga térmica no interior do local através do circuito de água e remover ou fornecer a energia necessária ao ar exterior para o colocar nas condições interiores antes de o insuflar no espaço. Na prática, a solução mais usual é colocar o ar a insuflar ligeiramente mais frio do que as condições pretendidas ($\approx 2^{\circ}\text{C}$) quando se está em regime de arrefecimento ou ligeiramente mais quente quando se está em regime de aquecimento. (L.Roriz)

Os equipamentos locais podem ser ventiloconvectores (VC's), injectoconvectores, vigas arrefecidas, ou um sistema de tubagem integrada no piso, parede ou tecto do compartimento. Um maior relevo será dado aos VC's, visto que é um equipamento que está presente num dos sistemas de climatização estudados e por se tratar de um equipamento muito utilizado nos sistemas de AVAC em Portugal.

Assim os sistemas que utilizam a água como fluido térmico podem ser classificados como: sistemas a 2 tubos, sistemas a 4 tubos e sistemas radiantes (piso, paredes ou tectos).

Em relação aos sistemas de 2 e 4 tubos que utilizem como unidade terminal os VC's, estas podem ser divididas segundo o processo de admissão de ar: com ar primário proveniente da UTA (recirculação), **com ar primário proveniente da UTA (directamente na entrada de ar do VC's)** e directamente do exterior. No caso em estudo, o sistema de climatização base utiliza VC's para corrigir a temperatura interior nos gabinetes, sendo que o ar primário é proveniente de uma UV, directamente na entrada de ar novo do VC, pelo que é feita uma breve referência apenas a este tipo de sistema.

2.3.1.2.2.1. Instalações de Ventiloconvectores com ar primário proveniente directamente da UTA

Neste tipo de instalação a única diferença face à anterior é que o ar primário é injectado directamente no VC, sendo a distribuição feita no local pelo ventilador incorporado no mesmo. Dependendo de caso para caso, o pré-tratamento do ar pode resumir-se a uma filtragem do ar exterior, evitando baterias de arrefecimento e aquecimento na UTA, passando esta a ser uma unidade de ventilação com uma ou mais secções de filtragem. Esta solução tem como grande vantagem a existência duma “**descentralização**” do tratamento de ar, passando este a ser feito localmente e com a possibilidade de atender as necessidades do espaço com uma maior

facilidade, tornando este sistema bastante flexível. Uma desvantagem que se poderá apontar a este tipo de sistema, prende-se com o facto de implantação física do mesmo, sendo por vezes muito difícil levar as condutas até aos VC's e quando é possível existe a necessidade de criar "couretes" e "negativos" e dotar os espaços de tecto falso para minimizar o impacto das condutas dentro dos compartimentos.

2.3.1.2.3. Sistema do tipo "Tudo-Água"

Nos sistemas "tudo-água", a energia térmica é levada ao local a climatizar por água. Existem diferentes tipos de soluções que se prendem com a possibilidade de poder ou não existir aquecimento e arrefecimento simultâneo e com o equilíbrio do sistema. As concepções são os sistemas a 2 e a 4 tubos. (L.Roriz)

Os VC's pertencem a esta classe quando deixam de ser as unidades terminais (quando combinadas com UTA's) e passam eles próprios a realizar o tratamento directo do ar exterior. Os sistemas "tudo-água" podem ser também do tipo radiante (tecto ou piso radiante) ou híbridos (convectivo-radiantes). Como os VC's já foram alvo de análise anteriormente e, porque os sistemas radiantes são estudados e analisados no capítulo dedicado aos resultados da presente tese, **a análise deste tipo de sistemas será integralmente dedicado aos sistemas radiantes.**

2.3.1.2.3.1. Sistemas "Tudo-Água" do tipo radiante - Pavimento

O aquecimento ou arrefecimento dos espaços utilizando sistemas radiantes é obtido por radiação e por convecção. Por razões de conforto térmico e como se desenvolve a convecção natural, é usual utilizar tectos radiantes para fins de arrefecimento e pavimentos radiantes para fins de aquecimento.

O pavimento radiante baseia-se num circuito de tubos embutidos no piso e num sistema de regulação térmica que permite controlar em qualquer momento a temperatura do ambiente nas diversas divisões úteis, através da circulação de água quente (só aquecimento). O aquecimento dessa água pode ser realizado através de uma caldeira, de uma bomba de calor ou recorrendo à energia solar térmica.

Existem na actualidade 2 tipos de pisos radiantes, os hidráulicos e os eléctricos.

O piso radiante hidráulico baseia-se num circuito de tubos embutidos no cimento, com um termóstato que regula a temperatura ambiente, através da circulação de água. A figura 4 ilustra o piso radiante do tipo hidráulico.



Figura 4 - Piso radiante hidráulico (à esquerda) e colector de ida e retorno do circuito hidráulico.

A nível da regulação dos pisos radiantes estes podem ser do tipo: regulação termostática, regulação electrónica com compensação e regulação climática.

Mais informação sobre o tipo de regulação existente nos pisos radiantes hidráulicos, pode ser consultada no anexo A da presente tese.

O funcionamento do piso radiante eléctrico é muito semelhante ao hidráulico na medida em que circula através de um circuito de tubos embutidos na argamassa, contudo não é necessário ter nenhuma instalação ou equipamentos próprios (chaminés e caldeiras respectivamente) para promover o aquecimento, sendo este gerado electricamente. Como no hidráulico, a temperatura ambiente é controlada através de um termóstato.

O piso radiante eléctrico tem vantagens que o piso hidráulico não tem e vice-versa, no entanto queria frisar que a **energia eléctrica** é a forma de **energia mais cara e “rebuscada” de ser produzida**, pelo que na minha opinião o uso de energia eléctrica deveria estar restrito por aplicações, como por exemplo para os equipamentos domésticos e de serviços, iluminação, etc. e **produzir energia eléctrica para de seguida transformá-la em energia térmica**, na minha óptica é um processo “contranatura”.

As vantagens dos sistemas radiantes face a outros tipos de sistemas são muitas, no entanto a principal na minha opinião é a inexistência de estratificação térmica no interior dos espaços, conforme ilustrado na figura 5, contribuindo o uso de sistemas radiantes em muito para um conforto térmico de excelência aliado ao facto de ser uma tecnologia que permite que o aquecimento seja realizado com baixa temperatura, proporcionando consumos energéticos mais baixos em comparação com outros equipamentos, tornando este sistema extremamente eficiente a nível energético.

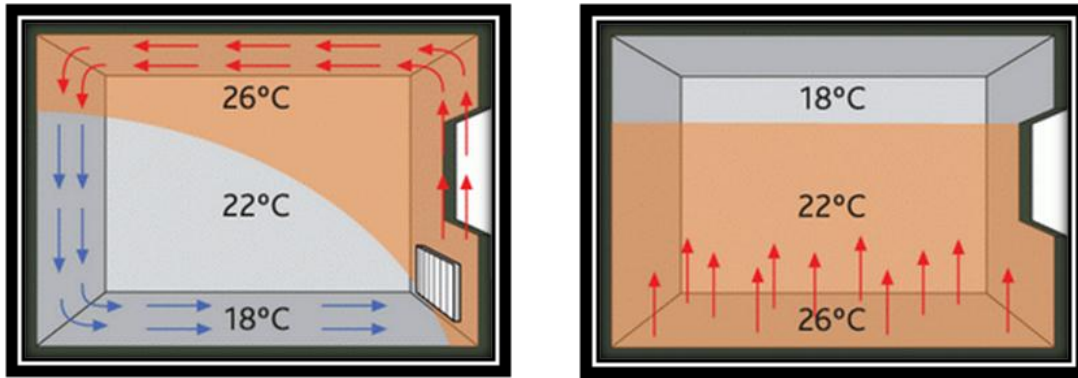


Figura 5 – Distribuição das temperaturas num espaço utilizando radiadores (à esquerda) e distribuição das temperaturas num espaço utilizando piso radiante.

O sistema radiante é considerado o sistema mais saudável para o tratamento do ar ambiente, pois não queima o oxigénio. O mesmo evita o levantamento de poeiras provocado pelas correntes de ar induzidas por escoamentos interiores forçados.

Para finalizar, o sistema radiante ao utilizar o efeito da convecção natural para tratar termicamente os espaços, a sua curva de distribuição da temperatura desde os pés até à cabeça do ser humano é muito semelhante ao aquecimento ideal, conforme é apresentado na figura 6.

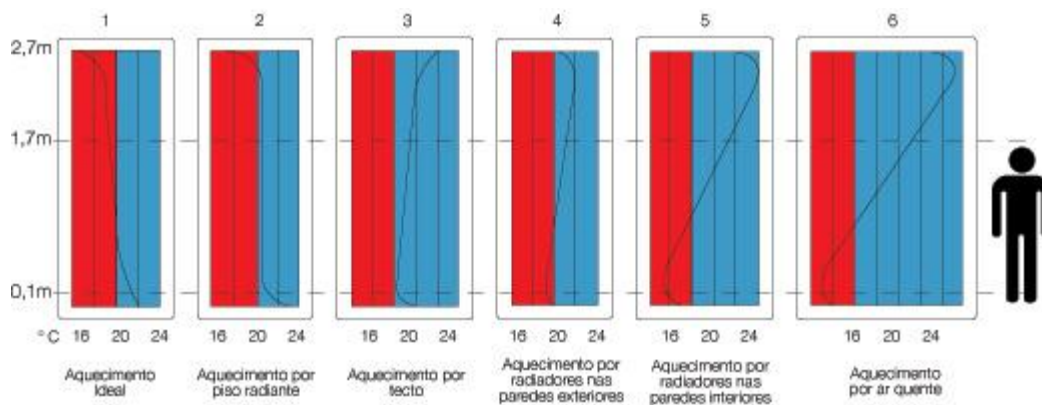


Figura 6 - Curvas de distribuição da temperatura do ar em relação ao corpo humano – Piso radiante.

2.3.1.2.3.2. Sistemas “Tudo-Água” do tipo radiante - Tecto

Como no piso radiante, este tipo de sistema é constituído por uma rede de tubagem que se encontra colocada no tecto em circuito fechado, em que a água que circula no seu interior está sujeita ao arrefecimento de uma fonte térmica exterior (*chiller* ou bomba de calor) e existe dissipação de energia no tecto, não existindo movimento forçado do ar, conforme ilustra a figura 7. O tecto radiante poderá efectuar aquecimento ou arrefecimento, no entanto será só abordado o tecto arrefecido, visto ser o sistema com maior interesse e que foi analisado na presente tese.

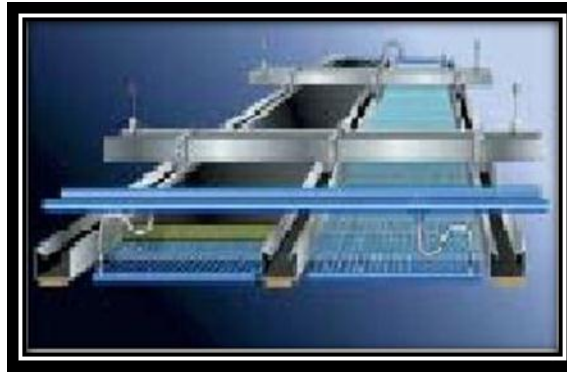


Figura 7 – Tecto arrefecido.

Os tectos podem ser utilizados como superfícies de climatização. O sistema elimina o calor do espaço sem inércia à medida que a água fria circula através deste. O projecto possui apenas uma capacidade mínima de armazenamento de calor e pode ser regulado muito facilmente. As malhas de tubos capilares instalam-se nos componentes estruturais perto da superfície, pelo que o efeito refrigerante é aproveitado directamente para o espaço. Normalmente, o arrefecimento **é efectuado através da água a uma temperatura de 14,5°C**, fornecida por uma UPAR, no entanto existe outro factor que normalmente tende a necessidade de elevar a temperatura da água para próximo dos 16°C, que é o facto de não ser recomendado que a diferença entre a temperatura entre o espaço interior e a temperatura média da água seja superior a 9 ou 10K, **por um factor de extrema importância e por conseguinte limitador da própria potência de arrefecimento do tecto, a condensação.**

Para evitar a formação de condensações, visto que, para uma temperatura interior de 25°C e uma humidade relativa interior pretendida de 50%, a temperatura de orvalho do ar para as condições atrás consideradas é sensivelmente igual a 14°C, limitando a capacidade dos mesmos para potências de arrefecimento a rondar o intervalo entre os 50 e os 90 W/m² com um aumento da temperatura de 9,5K (espaço/água fria), que mesmo assim, conjugado com os consumos energéticos dum sistema de ventilação auxiliar, **para garantir os caudais mínimos de ar novo impostos pelo RSECE torna-se numa solução particularmente eficiente.**

Convém frisar e finalizando o subcapítulo, que um sistema de tratamento do ar ambiente do tipo radiante permite um conjunto de vantagens que compensa o seu maior custo inicial, devendo ressaltar, por exemplo a produção de uma menor temperatura das superfícies, ou se preferirmos da temperatura radiante e assim os ocupantes podem dissipar uma maior quantidade do seu calor através de radiação aos tectos. **O impacto que a temperatura radiante** pode ter **nos consumos energéticos e no conforto térmico é vital**, conforme pode ser visualizado pelo leitor no capítulo 12 “Conforto Térmico Interior”, nas análises efectuadas ao conforto térmico interior para os diferentes sistemas de AVAC estudados. Outra vantagem é que o **fluxo de ar pode ser reduzido até ao valor mínimo necessário para garantir a QAI e cumprimento do RSECE**, visto que **o calor absorvido pelo ar é significativamente menor**, permitindo diminuir notavelmente o fluxo de ar e **aumentar a temperatura do ar que entra**, contribuindo estes pontos para a redução nos consumos energéticos referente à ventilação e do equipamento produtor de energia térmica. No entanto, o mesmo não dispensa um sistema auxiliar de ventilação e/ou tratamento do ar exterior, (potência de refrigeração limitada entre

os 50W/m^2 a 90W/m^2), que auxilie na remoção total das cargas térmicas existentes no espaço, garantindo ao mesmo tempo o cumprimento dos caudais de ar novo mínimo impostos pelo RSECE e da QAI.

2.3.2. Sistema de Expansão Directa

Nos sistemas de expansão directa o arrefecimento e o aquecimento são realizados directamente com a expansão directa de um fluido frigorífero, sendo os mais comuns os R-410A e o R-407C. Actualmente, este tipo de sistema é do tipo reversível, isto é, capazes de realizar arrefecimento na estação de Verão e aquecimento na estação de Inverno através da inversão das funções dos permutadores das unidades exterior e interior.

Como este tipo de instalação necessita de uma rede de tubagem onde circula o fluido frigorífero e que passa nos espaços interiores dos edifícios, deverá haver a preocupação **de cumprir e verificar a norma EN 378-1 referente a “Sistemas frigoríficos e bombas de calor” – Requisitos de segurança e protecção ambiental**, conforme é referido no RSECE, no capítulo V, artigo 14º, número 1, para evitar eventuais problemas de intoxicação dos ocupantes em caso de ruptura da rede de tubagem que contem o fluido.

Os sistemas de expansão directa podem ser divididos em três subcategorias: os sistemas individuais (de janela ou “*Mini-Split*”), os sistemas “*Multi-Split*” e os **sistemas VRV®**.

Dos sistemas de expansão directa atrás referenciados, apenas é feita referência ao sistema **VRV®** neste subcapítulo, porque é um dos sistemas de climatização estudados na presente tese e um lugar de **destaque deve ter**, visto que o mesmo **tem um papel preponderante no mercado AVAC nacional**, arriscando-me mesmo a dizer que actualmente assume um **papel de grande relevo a nível mundial**.

2.3.2.1. Sistema de Expansão Directa - Sistema VRV®

O sistema VRV® que se ilustra na figura 8 significa Volume de Refrigerante Variável e é um sistema de climatização com um tipo de expansão múltipla e directa, em que a unidade exterior pode ser ligada a várias unidades interiores. A quantidade de fluido refrigerante pode ser regulada livremente de acordo com a carga na unidade interior pelo compressor *inverter* numa unidade exterior.

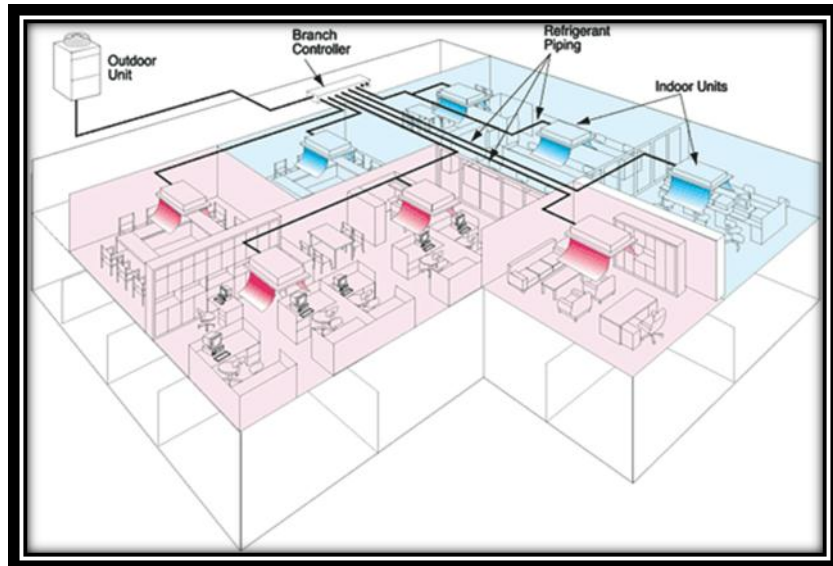


Figura 8 - Sistema VRV® – Aquecimento e arrefecimento em simultâneo – VRV® “Heat Recovery” [Fonte: Daikin].

Daqui em diante na presente tese, ao sistema VRV® será dada a nomenclatura de sistema VRF. Os sistemas VRF têm um princípio de funcionamento muito semelhante aos “Multi-Splits”, no entanto possuem a vantagem de possibilitar ligar um número de unidades interiores à unidade(s) exterior(es) muito maior em comparação com o sistema “Multi-splits”. Para que tal seja possível, foi necessário dotar e desenvolver um elevado controlo electrónico, tornando-o num sistema com uma adaptabilidade incrível às diferentes necessidades reais do edifício, contribuindo muito esta adaptabilidade **para diminuir os consumos energéticos** e por conseguinte **aumentar a sua eficiência energética** face a outro tipo de sistemas.

Para a contribuição no desenvolvimento dos sistemas VRF, a tecnologia “inverter” foi fundamental, contribuindo em muito para aumentar a flexibilidade e a eficácia do mesmo, permitindo que a saída do compressor seja modulada para corresponder aos pedidos de arrefecimento/aquecimento do espaço a climatizar.

O sistema VRF existe em 3 versões, versão só **arrefecimento, bomba de calor e recuperação de calor** que poderão ser a 2 ou 3 tubos. Existe ainda a possibilidade da **condensação ser realizada a ar ou a água**.

No caso em estudo da presente tese, o sistema VRF analisado é do tipo recuperação de calor, **com condensação feita a ar e de configuração a 2 tubos**. No entanto, por se tratar de uma vertente do mesmo, com surgimento posterior, deve-se pelo menos referenciar **o sistema VRF com condensação a água**, que infelizmente não foi possível simular devido às razões expostas no capítulo dos “Anexos”, subcapítulo J “Dificuldades sentidas”. **A vantagem** dos sistemas com o condensador arrefecido a água, é o facto de a água poder ser fornecida a **temperaturas constantes e volumes otimizados**, permitindo uma **flexibilidade e um COP ainda maior**, o que contribui para que estes sistemas se tornem ainda mais eficientes no capítulo energético.

Um sistema de 2 tubos que permita o arrefecimento e aquecimento é mais vantajoso e económico que um sistema a 3 tubos, visto que necessita de menos linhas de tubagem e o seu comando necessita de menos pontos de monitorização.

Um sistema VRF a 3 tubos é basicamente uma máquina em que todas as fases do circuito frigorífico ficam disponíveis para as respectivas unidades interiores ao mesmo tempo. Ao contrário duma bomba de calor, em que apenas um ciclo frigorífico é possível (aquecimento ou arrefecimento) em todas as unidades num dado momento, no sistema a 3 tubos é possível haver unidades interiores a efectuar aquecimento, e outras a efectuar arrefecimento, dado que a partir da unidade exterior (o "condensador") partem 3 tubos contendo as fases do fluido refrigerante: **aspiração - baixa pressão; descarga - alta pressão; e linha de líquido** até às caixas de mistura, sendo estas responsáveis por transformar as três linhas em duas, dado que as unidades interiores possuem uma serpentina interior que tem duas pontas. As caixas são, portanto umas espécies de "interruptores" com um jogo de válvulas que ligam à unidade interior aquilo que queremos tirar dela: aquecimento ou arrefecimento.

O controlo é da máxima importância para otimizar o desempenho de qualquer sistema de climatização, minimizando os seus custos de operação e aumentando a sua eficiência energética, principalmente quando estamos a falar de sistemas VRF. Estudos na área indicam que, por cada grau centígrado que o sistema se desvia da temperatura requerida, os custos em energia **podem subir num intervalo entre 5 até 10%**.

Em suma, um sistema VRF caracteriza-se pelo **seu baixo custo de exploração**, pois o sistema permite que cada zona seja controlada individualmente, possibilitando desactivar as unidades interiores em que os espaços não se encontram ocupados. O sistema ao contrário do que acontece com sistemas convencionais, como por exemplo *chiller* e UTA's, em que este último requer unidades de reserva para o caso de paragem por falha, o sistema VRF **como a unidade condensadora é feita por diferentes unidades, o sistema continua a funcionar no caso de uma unidade parar por falha**. Complementando o que foi dito anteriormente, há que referenciar que o **sistema VRF**, é um sistema de AVAC **com uma extrema eficiência energética**.

No entanto, em comparação com um sistema tradicional de climatização, normalmente o sistema VRF acarreta um custo de investimento inicial mais elevado. A operação e capacidade de refrigeração das unidades VRF, são reduzidas pelo aumento do comprimento da tubagem refrigerante, acabando a unidade exterior por ficar super-dimensionada (até um máximo de 130%), exigindo um ponto de força maior.

A instalação é crítica, assim como a manutenção, devido às longas linhas de circulação do fluido frigorigéneo e do acesso para limpeza e manutenção. É necessário um cuidado especial na montagem da tubagem **para prevenir eventuais fugas**.

Uma grande vantagem dos sistemas de climatização, que utilizam **a água como fluido térmico** é a possibilidade de permitirem a expansão de capacidade com maior facilidade, desde que previsto no projecto, enquanto que no caso dos sistemas VRF não é possível expandir, sendo necessário acrescentar mais unidades externas e internas. Os sistemas de AVAC que utilizam a

água como fluido térmico, permitem que não exista contacto directo entre o fluido refrigerante e os ocupantes do edifício, o que não acontece no sistema VRF e se pensarmos que há poucos anos ainda se **utilizava um fluido frigorígeno que prejudicava a camada de ozono**.

A QAI exige atenção especial nos sistemas VRV, **sendo sempre necessário um sistema complementar de ventilação que garanta o caudal de ar mínimo obrigatório pelo RSECE**.

2.4. Classificação dos sistemas em função do nível de segurança

Os sistemas podem ainda ser classificados em função do nível de segurança. Esta classificação é função da forma como a tubagem em que circula o fluido frigorígeno (secundário) contacta com as zonas ocupadas. É aplicada essencialmente para sistemas utilizando fluidos frigorígenos halogenados (L.Roriz).

Os sistemas podem ser classificados em directos e indirectos, podendo ser abertos ou fechados. Nos sistemas directos (fechados) a tubagem do fluido frigorígeno contacta com zonas onde pode ocorrer ocupação. Estes sistemas correspondem aos sistemas tudo-refrigerante. Nos sistemas indirectos o fluido primário é um fluido frigorígeno e o fluido secundário é o ar ou a água. Estes sistemas correspondem aos sistemas a ar e a água: sistemas tudo-ar, tudo-agua e ar-agua. (L.Roriz)

Os sistemas directos abertos, normalmente designados em refrigeração por sistemas de perda total, não são utilizados em climatização.

De acordo com a norma **NP EN 387**, a utilização dum sistema com um dado nível de segurança é função da classe de segurança do fluido frigorígeno tipo e utilização do edifício a climatizar.

2.5. Considerações aos sistemas

Neste capítulo foi feito uma síntese e uma descrição dos diferentes tipos de sistemas produtores de energia térmica e de AVAC estudados na presente tese. Escolher qual o tipo de sistema é um desafio enorme, sendo uma decisão que deverá ter em conta vários factores e estudos.

No sistema base de climatização, primeiramente será analisada a sua envolvente e, por conseguinte medidas irão ser propostas no sentido de otimizar a envolvente do ponto vista térmico e energético. Com as medidas introduzidas, um novo sistema será estudado, o **“sistema base com a envolvente otimizada”**. Analogamente ao ocorrido na envolvente do edifício, será proposto algumas propostas que visam garantir uma maior eficiência energética do sistema de AVAC base com a envolvente otimizada, passando a ser denominado de **“sistema otimizado”**. A adopção do piso radiante e do tecto arrefecido proposto para este sistema, tem o principal objectivo de baixar os consumos energéticos, utilizando tecnologia

que permita climatizar com baixa temperatura, sem descurar o conforto térmico, permitindo mesmo um aumento da temperatura de insuflação do ar.

Dois novos sistemas de climatização serão incorporados na análise e estudo da presente tese, mas por motivos diferentes. **O sistema VRF** é proposto como sistema alternativo, no sentido de ser uma possível alternativa ao sistema otimizado, visando garantir uma eficiência energética ainda maior. A inclusão do **sistema “Green System”** tem outro objectivo, que é de reduzir o número de emissões de CO₂ enviadas para a atmosfera, assentando o seu sistema de climatização e tratamento do ar nos espaços, no sistema otimizado. A grande diferença entre o **“Green System”** e os outros sistemas é como a energia térmica é produzida, com recurso a energias renováveis.

Fazendo a interligação entre o **RSECE** e os sistemas produtores de energia térmica e os sistemas de climatização descritos anteriormente, convém lembrar que existe um conjunto de requisitos impostos pelo RSECE que têm que ser cumpridos, a saber:

- Na classificação **dos sistemas quanto à área** é fulcral face ao Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização de Edifícios (RSECE), pois o facto de um determinado sistema pertencer a um ou outro grupo tem implicações. O regulamento impõe restrições ao uso de sistemas individuais, e considera apenas a existência de dois grandes grupos: **os sistemas unitários e os sistemas centralizados**.

Segundo o **n.º.1 do artigo 14º**: “ *Em todos os edifícios novos de serviço, bem como nos existentes sujeitos a grande reabilitação, sempre que a soma das potências de climatização das fracções autónomas num edifício, e para um mesmo tipo de uso, seja superior a 4 Pm (100 kW), é obrigatoriamente adoptado um sistema de climatização com produção térmica centralizada, aplicando-se as restrições da EN 378-1, a menos que existam dificuldades técnicas ou impedimentos de outra natureza, devidamente justificados e aceites pela entidade licenciadora, ou que seja demonstrada a não viabilidade económica da adopção de um sistema centralizado nesse edifício*”.

Para mostrar a importância da classificação dos sistemas face à área que servem, o regulamento ainda indica no **n.º.8 do mesmo Artigo 14º**, é dito o seguinte: “**O recurso a unidades individuais de climatização para aquecimento ou arrefecimento em edifícios de serviços licenciados posteriormente à data da entrada em vigor do Decreto-Lei n.º.118/98, de 7 de Maio, ou em cada uma das suas fracções autónomas, só é permitido nos espaços que apresentem cargas térmicas ou condições interiores especiais em relação às que se verificam na generalidade dos demais espaços da fracção autónoma ou edifício, ou não ultrapassarem 12 kW de potência instalada de ar condicionado por edifício ou fracção autónoma, ou quando houver dificuldades técnicas ou impedimentos fortes de outra qualquer natureza devidamente justificados e aceites pela entidade licenciadora**”.

Em suma, o regulamento obriga a que um sistema seja centralizado sempre que a potência de aquecimento ou arrefecimento de um edifício seja superior a **100 kW** para fracções autónomas que tenham o mesmo tipo de uso. No entanto, quando a potência de aquecimento ou arrefecimento é superior a 100 kW o RSECE indica no n.º.14 do Artigo 14º o seguinte: “É

obrigatório o recurso à repartição da potência de aquecimento em contínuo ou por escalões, de acordo com o indicado no anexo II, publicado em anexo ao presente Regulamento e que dele faz parte integrante, excepto nos casos em que, pelos seus baixos consumos, seja demonstrada a não viabilidade económica desta repartição, segundo a metodologia definida no presente Regulamento”.

O RSECE obriga também que, sempre que haja uma fracção autónoma de um edifício de serviços que tenha unidades individuais com uma **potência total instalada superior a 12 kW**, que o sistema de climatização do edifício seja também centralizado, mesmo que **a potência total seja inferior a 100 kW**. Por fim obriga também à verificação do cumprimento da norma EN 378-1 referente a “Sistemas frigoríficos e bombas de calor – Requisitos de segurança e protecção ambiental”.

A nível da legislação o RSECE obriga a adopção de equipamentos nos seguintes casos:

No nº.6 do artigo 14º pode-se retirar a seguinte obrigação imposta pelo RSECE: *“Sempre que a potência térmica de rejeição em condições de projecto **seja superior a 80 kW**, obriga o recurso à recuperação de energia no ar de rejeição, na estação de aquecimento, com eficiência mínima de 50%, ou recuperação de calor equivalente, exceptuando-se os casos em que seja demonstrada em projecto a não viabilidade económica da sua instalação, segundo metodologia seguida pelo regulamento”.*

No nº.7 do artigo 14º pode-se retirar a seguinte obrigação imposta pelo RSECE: *“Nos sistemas de climatização do tipo **“tudo ar”**, com um caudal de ar de insuflação **superior a 10000 m³/h**, obriga a instalação de dispositivos que permitam o **arrefecimento dos locais apenas com ar exterior quando a temperatura ou a entalpia do ar exterior forem inferiores à do ar de retorno (free-cooling)**, exceptuando-se os casos em que seja demonstrada em projecto a não viabilidade económica da sua instalação, segundo metodologia seguida pelo regulamento”.*

Quando é utilizado o **reaquecimento terminal com resistências eléctricas** é necessário verificar o RSECE, pois este limita a potência das baterias eléctricas conforme e referido no **nº.6 do artigo 14º** - *“A **potência eléctrica para aquecimento por efeito de Joule, não pode exceder 5% da potência térmica de aquecimento até ao limite de 25 kW** por fracção autónoma de edifício, exceptuando-se os casos em que seja demonstrada em projecto a não viabilidade económica da sua instalação, segundo metodologia seguida pelo regulamento”.*

O mesmo regulamento restringe a potência dos equipamentos para a realização de aquecimento terminal, conforme é referido no **nº.7 do artigo 14º** - *“Nos sistemas destinados a **arrefecimento** é permitida a instalação de equipamento destinado a **reaquecimento terminal, cuja potência não pode exceder 10% da potência de arrefecimento a instalar, sendo admissível o recurso a resistência eléctrica dentro das condições especificadas no ponto anterior”.***

O sistema de VAV, que assenta na variação de caudal com temperatura constante, existirá também a necessidade de dotar os equipamentos responsáveis de injectar o ar dentro dos diferentes locais (propulsores e difusores), de características especiais para garantir sempre as condições mínimas de qualidade do ar interior (QAI). O RSECE sobre esta matéria obriga a:

No n.º.1 do artigo 4º - *“Os requisitos exigenciais de conforto térmico de referência para cálculo das necessidades energéticas, no âmbito do presente Regulamento, são os fixados no RCCTE, tendo ainda em conta que a velocidade do ar interior não deve exceder os 0,2 m/s e que quaisquer desequilíbrios térmicos devem ser devidamente compensados”*.

Em relação aos elementos propulsores de fluido (electrobombas e ventiladores) o RSECE diz:

No n.º.16 do artigo 4º - *“Os elementos propulsores dos fluidos de transporte, cujos motores devem ter classificação mínima EFF2, conforme classificação nos termos do acordo voluntário entre os fabricantes de motores eléctricos e a Comissão Europeia, são seleccionados de modo que o seu rendimento seja máximo nas condições de funcionamento nominal, e as respectivas potências devem ser adequadas às perdas de carga que têm de vencer, sendo que, no caso dos equipamentos de caudal variável, este requisito se aplica sob condições de funcionamento médio ao longo do respectivo período de funcionamento anual”*.

Para todos os sistemas de climatização o RSECE obriga a:

No n.º.1 do artigo 29º - *“... no projecto dos novos edifícios dotados de sistemas de climatização com ventilação mecânica abrangidos pelo presente regulamento devem ser garantidos os caudais mínimos de ar novo que constam no anexo VI publicado em anexo ao presente regulamento e que dele faz parte integrante, para renovação do ar interior e qualidade do ar aceitável em espaços em que não haja fontes atípicas de poluentes e sem fumadores”*.

No caso dos sistemas VRF, em que este tipo de instalação necessita de uma rede de tubagem onde circula o fluido frigorigéneo e que passa nos espaços interiores dos edifícios, deverá haver a preocupação **de cumprir e verificar a norma EN 378-1 referente a “Sistemas frigoríficos e bombas de calor” – Requisitos de segurança e protecção ambiental**, conforme é referido no RSECE, no capítulo V, artigo 14º, número 1, para evitar eventuais problemas de intoxicação dos ocupantes em caso de ruptura da rede de tubagem que contem o fluido.

3. Conforto térmico, [21] [22] [35]

A missão dos sistemas de climatização é promover condições térmicas e de qualidade do ar aceitáveis para o ser humano. Esta secção é destinada à análise do conforto térmico e consiste, fundamentalmente, na abordagem e análise das normas ISO¹⁷ - 7730 “*Moderate thermal environments - Determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort*” e da ASHRAE 55 – “*Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*”, utilizadas na presente tese para quantificar o conforto térmico interior.

A norma ISO 7730, publicada em 1984 e revista em 1994, conjuntamente com a sua congénere 55 da *ASHRAE*, continuam a não ser interpretadas e/ou utilizadas na actualidade, não sendo comum em Portugal projectos de climatização, que envolvam ou estudem o conforto térmico. Tradicionalmente, assiste-se a um cumprimento de um caderno de encargos por parte de quem projecta, no objectivo de cumprir o que é definido, normalmente, com temperaturas do ar interiores já pré-definidas. **No entanto, como se pode definir uma temperatura interior, sem no mínimo realizar um estudo do conforto térmico e do próprio sistema de AVAC que vai ser implementado? Qual é o grande objectivo de um sistema de AVAC? Não será proporcionar um conforto térmico de qualidade, sem comprometer os consumos energéticos do mesmo?**

Conforme se pode visualizar no capítulo 12 “Conforto Térmico Interior”, a **análise ao conforto térmico** é de extrema importância e utilidade, **não só influenciando os futuros consumos energéticos de um edifício, como mesmo na escolha do próprio sistema de climatização**. Um sistema de AVAC pode ser mais eficiente que outro, em determinadas condições, no entanto, ao alterarmos as condições iniciais tudo muda, e o que antes era verdadeiro poderá no futuro ser falso. Fazendo uma reflexão sobre alguns estudos referente aos consumos energéticos de um edifício, os mesmos indicam que **uma redução de 1°C na temperatura do ar interior** poderá gerar uma economia com os **gastos energéticos entre 5 a 10%**.

3.1. ISO-7730 – Parâmetros do conforto térmico e metodologia

O calor produzido no corpo humano é determinado pelo nível de actividade da pessoa, sendo também variável com a idade e o sexo. A dissipação do mesmo é conseguida através de três mecanismos principais, que são por convecção, a radiação e a evaporação, no entanto na teoria deveriam ser quatro e não três os principais mecanismos de transferência de calor inerentes ao corpo humano, no entanto, na generalidade da literatura é excluída a condução, pois esta não assume geralmente grande relevância.

Os parâmetros mais importantes do conforto térmico subdividem-se em duas classes:

- Parâmetros individuais:
 - Actividade - (nível de metabolismo)
 - Vestuário - (resistência térmica às trocas de calor)
- Parâmetros ambientais:
 - Temperatura do ar - (trocas de calor por convecção)
 - Humidade do ar - (trocas de calor por evaporação)
 - Velocidade do ar - (trocas de calor por convecção)
 - Temperatura média radiante - (trocas de calor por radiação)

A norma ISO 7730 considera que um espaço apresenta **condições de conforto térmico quando não mais do que 10% dos seus ocupantes se sintam desconfortáveis**. A quantificação da percentagem de desconforto foi feita através de estudos que envolveram 1300 pessoas. Estes estudos permitiram estabelecer uma relação entre o resultado do balanço energético do corpo e a tendência de insatisfação, designada por PPD (*Predicted Percentage of Dissatisfied*).

A metodologia de cálculo consiste nos seguintes pontos:

- **Parâmetros:** quantificam-se os parâmetros individuais e ambientais das pessoas e do ambiente.
- **Equação de Conforto:** substituem-se estes valores na equação de conforto térmico para determinação do termo associado à acumulação energética no corpo, S.
- **PMV:** com base no valor da acumulação energética no corpo e no metabolismo determina-se o valor de PMV (*Predicted Mean Vote*) através de uma correlação. O PMV não é mais do que uma escala quantitativa da sensação de calor e de frio.
- **Insatisfação:** a percentagem de pessoas insatisfeitas termicamente, PPD, é determinada com base no valor de PMV através de uma correlação.

Uma análise a todos os parâmetros do conforto térmico individuais, ambientais e a metodologia de cálculo que tem por base a equação do conforto térmico podem ser consultados no anexo B da presente tese.

3.2. PMV

O PMV “*Predicted Mean Vote*”, criado por Fanger consiste em um valor numérico que traduz a sensibilidade humana ao frio e ao calor. Este valor numérico permite quantificar e calcular a combinação das variáveis ambientais descritas anteriormente neste capítulo. A tabela 3 ilustra os valores numéricos do PMV e respectivo significado, sendo que o PMV de conforto é igual a zero, valores negativos e positivos correspondem à sensação que o ocupante poderá ter de frio e calor respectivamente.

Tabela 1 - PMV e respectivo significado - [Fonte: ISO 7730].

Valor de PMV	Significado
3	Insuportavelmente quente
2	Quente
1	Ligeiramente quente
0	Neutro
-1	Ligeiramente frio
-2	Frio
-3	Insuportavelmente frio

A sua determinação é feita pela aplicação de uma correlação envolvendo o termo de acumulação de energia (S) no corpo e o metabolismo (M).

3.3. PPD – Desconforto térmico

A partir da criação do PMV foi implementado o conceito de pessoas insatisfeitas (*PPD – Predicted percentage of dissatisfied*), que calcula-se de acordo com correlação matemática ou através da representação gráfica da figura 9, no entanto, a norma ISO 7730 de 1984 adoptou as pesquisas de *Fanger*, recomendando: “Para espaços de ocupação humana termicamente moderados, o PPD deve ser menor que 10%” (o que corresponde a uma faixa do PMV de -0,5 a +0,5).

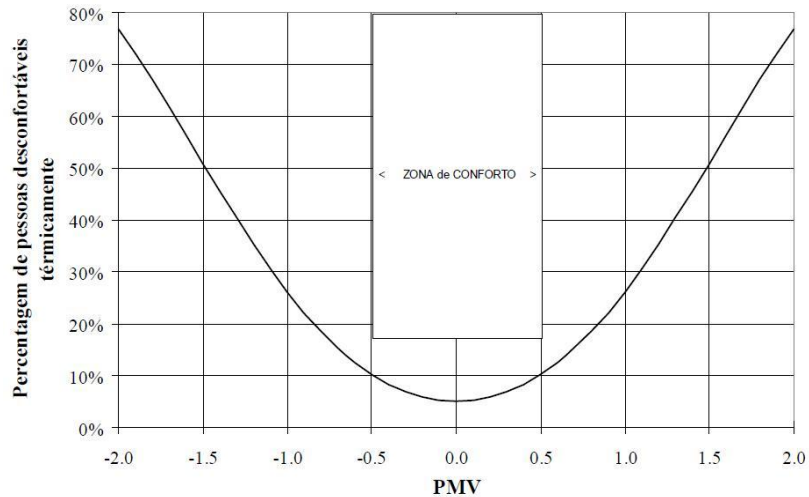


Figura 9 – Gráfico do PMV vs PPD – [Fonte: ISO 7730].

A ISO 7730 impõe outras regras necessárias para conforto térmico, relacionadas com os parâmetros de conforto, tais como a existência de assimetria da temperatura radiante de janelas ou outra superfície vertical fria, **deve ser inferior a 10°C** (em relação a um plano vertical 0.6 m acima do chão). **A velocidade do ar** tem de ser no **Inverno inferior a 0.15 m/s**, com temperaturas entre **20 e 24°C**. No Verão inferior a **0.25 m/s**, com temperaturas entre **23 e 26°C**. **A diferença de temperatura do ar a 1.1 m e a 0.1 m acima do chão não deve exceder 3°C**. A temperatura do chão deve situar-se entre 19 e 26°C excepto em pavimentos radiantes podendo atingir neste caso os 29°C.

Das regras atrás indicadas, **o RSECE adopta o valor intermédio ($v \leq 0,2$ m/s) da norma ISO 7730**, no que se refere à velocidade do ar. Nas temperaturas do ar interiores nada é referido no RSECE, no entanto é tradicional assistir-se a uma temperatura de interior de 20 e 25°C para Inverno e Verão respectivamente, valores estes originários da norma ISO 7730. No entanto, um conjunto de importantes regras descritas pela norma ISO 7730 poderiam complementar o regulamento vigente, tal como a limitação da estratificação térmica no interior dos espaços climatizados, principalmente nos sistemas que utilizam convecção forçada como meio primordial de transferência de calor, que são a maioria dos sistemas de climatização implementados em Portugal.

Uma conclusão interessante da figura 9 é que qualquer que seja as condições ambientais, não se consegue menos do que 5% de descontentes.

3.4. Norma ASHRAE 55

Conforme a ISO 7730, **a norma ASHRAE 55** define condições consideradas satisfatórias para uma percentagem específica de ocupantes, baseada, igualmente, nas metodologias de *Fanger*.

Uma das diferenças que ressalta entre a norma ASHRAE 55 para a ISO 7730, relativamente à sua metodologia de cálculo dos índices de conforto térmico, é na definição de alguns pressupostos. Enquanto a ISO 7730 fixa o parâmetro da humidade relativa interior e iguala a

50%, a **ASHRAE 55** é mais flexível neste parâmetro, **não fixando um valor específico para a humidade relativa interior**, fixando antes, valores para os **parâmetros relativos ao vestuário e actividade física**, no entanto, para outros níveis de vestuário que não se coadunam com a referida norma, as temperaturas fronteiras podem ser diminuídas em 0.6 K por cada 0.1 Clo de incremento e vice-versa, de igual modo, as temperaturas de fronteira podem ser diminuídas em 1,4 K por cada Met de incremento, acima de 1,2 Met. Na minha opinião, a norma **ASHRAE 55** é mais flexível que a ISO 7730, sendo que, as duas partem dos mesmos pressupostos e são muito semelhantes. Convém frisar que o estudo do conforto térmico para os sistemas de AVAC analisados na presente tese, assentou na ISO 7730, no entanto, e conforme pode ser visualizado no capítulo dos resultados, para o sistema VRF a norma utilizada foi a **ASHRAE 55**.

4. Importância da simulação dinâmica no estudo térmico/energético dos edifícios

A actual preocupação em limitar e regular os consumos energéticos referente aos edifícios, bem como a presente regulamentação vigente em Portugal, que torna o uso obrigatório de um *software* de simulação dinâmica, acreditado pela norma *ASHRAE 140-2004*, tem despoletado uma maior procura e a utilização deste tipo de *software*, constituindo actualmente a base inicial para qualquer projecto de AVAC. No entanto, este tipo de *software* é importante não só pelo exposto anteriormente, mas também porque permite tomar decisões e seguir estratégias de uma forma mais segura e correcta em fase de projecto, sustentadas pelo um modelo matemático, sendo o mesmo traduzido em parâmetros energéticos.

Entre as várias vantagens óbvias da utilização dos *softwares* de simulação dinâmica, como por exemplo, a previsão mais segura das cargas térmicas e consumos energéticos do edifício, existem outras vantagens que também estão interligadas com as referidas anteriormente e, que poderão ser simuladas, contribuindo para futuras decisões correctas e concretas, que terão que ser tomadas ou levadas em linha de consideração, tais como por exemplo a inclusão ou não de “*free-cooling*”, estudo e definição dos sombreamentos interiores e exteriores, o isolamento térmico a ser colocado e conseqüentemente o efeito da inércia térmica interior, o tipo de vidro mais adequado, etc, entre muitos outros, **reforçam o papel fulcral e a versatilidade** que este tipo de *software* tem actualmente, constituindo uma ferramenta poderosa quando bem aplicado e explorado, contribuindo o mesmo para a tomada consciente de decisões inerentes a qualquer projecto de climatização de um edifício.

No contexto do novo RSECE - Regulamento dos Sistemas Energéticos e de Climatização dos Edifícios (D.L.79/2006) a utilização de simulação detalhada multizona passa a ser obrigatória para os "grandes edifícios de serviços", conforme referido no presente regulamento no nº1 do artigo 14º: “**As potências térmicas de aquecimento ou de arrefecimento dos sistemas de climatização a**

*instalar nos edifícios abrangidos pelo presente Regulamento, nos termos do artigo 2º, não podem exceder em mais de 40% o valor de projecto estabelecido pelo método de cálculo adoptado para dimensionar os sistemas de climatização do edifício, quer seja por **simulação dinâmica multizona, método obrigatório para os grandes edifícios de serviços**, quer seja por simulação dinâmica simplificada, do tipo zona única, admissível para os pequenos edifícios de serviços e para os edifícios residenciais”.*

Para explicitar a importância do *software* e da simulação dinâmica, a ADENE considera que um perito, ao efectuar a certificação dum dado projecto deverá utilizar o mesmo *software* de simulação dinâmica que foi utilizado pelo projectista, no entanto, e conforme será analisado no capítulo 7, esta imposição do RSECE pode não ser suficiente, visto que a possibilidade de utilização de diferentes metodologias no cálculo da C.T pode induzir a desvios significativos e por conseguinte, a classificações energéticas de edifícios que poderão não corresponder na íntegra com a realidade.

4.1. Software de simulação dinâmica

Existem vários *softwares* passíveis de utilização para a simulação dinâmica do comportamento térmico e energético para edifícios. Pretende-se neste ponto, apresentar resumidamente algumas limitações e capacidades dos *softwares* de simulação energética e apresentar sucintamente o *software* utilizado na elaboração dos resultados da presente tese, o *DesignBuilder*.

As limitações mais comuns neste tipo de *softwares* prendem-se normalmente com a definição de geometrias complexas e respectivos sombreamentos e com a implementação para a simulação energética de sistemas de AVAC menos convencionais.

As grandes diferenças entre os *softwares* de simulação dinâmica, têm por base a forma como se fornece/introduz-se os *inputs* necessários e o nível de detalhe dos mesmos.

Na generalidade, estes *softwares* através de *inputs* introduzidos pelo utilizador na construção e concepção do edifício, ou neste caso da sua envolvente interior e exterior, permitem ao mesmo criar um modelo energético ajustado a determinadas formulações e funções inerentes a cada metodologia de cálculo utilizada, ou mesmo seleccionada pelo utilizador. Estando vários programas acreditados pela norma *ASHRAE 140-2004* e com metodologias de cálculo consensualmente aceites, a pergunta do professor Luís Roriz deverá ser destacada e colocada: **qual o motivo de surgirem situações em que a aplicação de *softwares* diferentes leva à obtenção de resultados diferentes?** (L.Roriz)

Na tentativa de resposta a esta questão têm-se as possíveis causas, como por exemplo, diferenças existentes pela utilização de diferentes métodos de cálculo, cujas variações são pequenas e diferenças existentes de acordo com o critério do utilizador. A interpretação da arquitectura ou a simplificação de qualquer um dos vectores base para o desenvolvimento de uma simulação dinâmica pode ser o ponto de partida para a obtenção de resultados inesperados. Por fim, diferenças existentes na base de dados dos ficheiros climáticos usados por cada *software*, como por exemplo a radiação solar difusa.

No que toca ao primeiro ponto, no capítulo 7.1, “Comparativo entre o *DesignBuilder* e o TRACE 700 – Norma *ASHRAE 140-2004*” é feita uma abordagem que permite conhecer mais profundamente e analiticamente os contornos desta variável. Relativamente à variável introduzida pelo critério do utilizador, os efeitos negativos desta podem ser minimizados, se houver método e cuidado na aplicação do problema, no entanto existem programas que propiciam mais à introdução de erros do que outros, como por exemplo, se analisarmos o TRACE 700 e DB aquando da introdução dos dados para definição geométrica do edifício. Enquanto o **DB permite visualizar *in-loco* o que se define, sendo uma própria verificação ao modelo criado**, o TRACE 700 é mais rígido e não possibilita a visualização do edifício em pleno como o DB, sendo por isso mais propenso a erros na introdução dos dados geométricos.

Para um correcto desenvolvimento do modelo da simulação dinâmica, destacam-se alguns pontos a definir imediatamente após a escolha do ficheiro de dados climáticos adequado ao local do edifício real, como por exemplo a definição dos períodos de simulação, cargas térmicas internas, definição se existirem de sombreamentos exteriores e interiores, entre muito outros.

A leitura dos resultados de uma simulação dinâmica deve ser feita sempre com espírito crítico, visto que, o *software* gera resultados de acordo com os *inputs* introduzidos pelo utilizador.

4.2. *Energy Plus 7.0* com interface gráfico do *DesignBuilder* versão 3, [13] [14]

O *software Energy+* é um dos *softwares* mais divulgados actualmente, encontrando-se num processo de consolidação face a outros *softwares* de simulação dinâmica, tendo surgido em 1996. O *Energy+* resulta de uma combinação entre dois programas já existentes após a sua criação, o *DOE-2* e o *BLAST*, sendo um dos *softwares* mais “*user friendly*” actualmente. De fornecimento gratuito, o *site* do mesmo permite obter constantes actualizações, que corrigem “*bugs*” detectados pelos utilizadores do mesmo. Este *software* possui inúmeras vantagens, no entanto destacaria uma delas, o mesmo é um ***software de código aberto* (*open source*)**, o que significa que permite por exemplo, o desenvolvimento independente de ferramentas de apoio ao utilizador deste *software*, ou até mesmo, módulos de cálculo de propriedades físicas de acordo com as necessidades do caso em estudo do utilizador.

Quando se fala no *Energy+*, é inerente relacioná-lo ao DB, pois o *Energy+* é o “*cérebro*” de cálculo do mesmo, pelo que este ponto é mais uma vantagem do DB face aos seus rivais mais directos.

O *Energy+* tem capacidades de simulação únicas e diferenciadas, podendo-se destacar por exemplo, “*time-step*” de cálculo menor que uma hora, sendo que tradicionalmente para o estudo de sistemas de climatização um “*time-step*” de uma hora é suficiente, possibilidade de cálculo de infiltração de ar diferenciada para cada zona térmica, cálculo de índices de conforto térmico, como por exemplo o modelo de *Fanger*, entre muitas outras capacidades que o mesmo tem e que aqui não serão referenciadas.

O *software Energy+* apresenta algumas características que o colocam à frente de diversos programas de simulações termo energéticas, como por exemplo o uso da técnica de solução

baseada **no balanço de energia** para as cargas térmicas do edifício, que permite o cálculo simultâneo dos efeitos radiante e convectivo na superfície interior e exterior, durante cada intervalo de tempo, utiliza o modelo de céu anisotrópico para cálculos mais complexos da radiação difusa sobre superfícies inclinadas, cálculo do balanço de calor de envidraçados, que permite o controlo electrónico de persianas, balanço térmico camada por camada, o que permite a identificação do comprimento de onda da energia solar absorvida pelo vidro da janela, são algumas das muitas características, que ajudam a consolidar e a justificar a sua posição que actualmente este software tem entre os softwares de simulação dinâmica.

Além disso, o programa *Energy+* integra vários módulos que trabalham juntos para calcular a energia requerida para aquecer/arrefecer um edifício usando uma variedade de sistemas e fontes de energia. Ele faz isso simulando o edifício e os sistemas associados em diferentes condições ambientais e operacionais. **A essência da simulação está no modelo do edifício que utiliza princípios fundamentais de balanço energético.**

No entanto uma das grandes desvantagens deste *software* era a sua interface gráfica com o utilizador, que apesar de ser mais fácil que softwares como o *BLAST* por exemplo, o *Energy+* continuava a ser um software de aprendizagem bastante mais lenta que alguns dos seus concorrentes directos. No entanto, **uma ferramenta** poderosa foi criada com o intuito de **eliminar qualquer contacto directo com o *Energy+* que foi o *DesignBuilder***, sendo o *Energy+* o “motor” de cálculo para a simulação das cargas e consumos energéticos de um edifício, só que agora aliado à introdução dos dados no *DesignBuilder* com uma interface bastante mais amigável que a que o *Energy+* proporcionava anteriormente aos seus utilizadores.

O *DesignBuilder* permite e facilita o uso do *Energy+*, permitindo ao utilizador retirar todas as suas capacidades evidenciadas anteriormente, sem este ter um contacto directo com o *Energy+*. As ferramentas que inclui permitem que até os edifícios mais complexos, sejam desenhados e modelados pelos utilizadores de uma forma divertida, fácil e bastante dinâmica, combinando as funcionalidades de rápida modelação de edifícios e facilidade de uso, com simulação energética dinâmica de ponta, possibilitando testar estratégias de optimização energética. Uma das capacidades mais “badaladas” do DB, **são as fantásticas imagens/filmes que se podem tirar em qualquer estágio do desenvolvimento do modelo**, dados do comportamento físico e ambiental do edifício, bem como a possibilidade de se obter dados concretos de funcionamento do edifício quando eles são mais necessários, no processo de concepção do mesmo, quando as alterações são ainda fáceis de efectuar.

Uma outra capacidade que o *software* possui é na vertente educativa, isto é, como **possui uma interface intuitiva e bastante amigável para o utilizador**, evitam que os estudantes percam muito tempo na aprendizagem e manuseamento do software.

A versão 3 do DB utilizada nesta tese já incorpora o módulo ***HVAC Detailed Simulation***, tendo sido este módulo a base para as inúmeras simulações dinâmicas efectuadas para a obtenção dos resultados incorporados na presente dissertação. A maior capacidade deste módulo, é permitir a criação de sistemas de AVAC conforme as necessidades do utilizador, no entanto por ser um módulo recente existem algumas limitações que vão sendo ultrapassadas pelas constantes actualizações ao mesmo e disponíveis no seu *site* oficial. A iluminação natural também pode ser

simulada utilizando o novo módulo “*Daylighting*”, utilizado também na presente tese, e um “*Plugin*” de transferência de dados de *Revit* para *Design Builder*, facilitando a importação. **Na mesma versão do DB já está disponível o novo módulo IEE versão 1.0.a**, que permite efectuar cálculos de energia e do IEE por fracção autónoma e por tipologia no modo de AVAC simples (*Simple HVAC*), na versão v2 *release: 2.9.0.002* e na versão v3 BETA do *DesignBuilder*.

4.3. Programa de simulação para os sistemas solar térmico e fotovoltaico – SolTerm, [34]

Neste subcapítulo é feita uma abordagem sintetizada ao programa utilizado na presente tese, o SolTerm, que contribui para análise de desempenho de sistemas solares, sendo este elaborado pelo LNEG²³.

O SolTerm contém uma climatologia para os 308 Concelhos de Portugal, a nível horário, e bancos de dados modulares de componentes, permitindo simular a operação da grande maioria das configurações de sistemas solares, explorar as vertentes económica e de benefícios ambientais, e assim fazer o pré-dimensionamento e conduzir ao adequado dimensionamento de sistemas solares.

O SolTerm é ainda o *software* a ser utilizado na contabilização da contribuição de sistemas de energias renováveis para o balanço energético de edifícios, no contexto do Sistema de Certificação de Edifícios, Decretos-Lei 78, 79 e 80/2006, de 4 de Abril, com o qual a versão 5 foi especificamente compatibilizada.

4.4. Norma ASHRAE 140 – 2004, [36]

Como foi referido anteriormente no capítulo 1, subcapítulo 1.2.2 – “Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios (Decreto-Lei nº80/2006 de 4 de Abril)”, o uso do *software* de simulação dinâmica é obrigatória para edifícios com uma área de pavimento útil superior a 1000 m², conforme invocado pelo RSECE no seu capítulo 3, artigo 8º. Conforme referido anteriormente no subcapítulo 1.2.2, o mesmo está excluído dos requisitos do RSECE, no entanto na minha opinião e para dar uma base e consistência sólidas aos resultados obtidos na presente tese, **é indispensável** não utilizar um *software* de simulação dinâmica, pelo que a mesma utilizou o *software DesignBuilder*, acreditado pela norma ASHRAE 140-2004.

Na presente tese foi referenciado anteriormente esta norma, pelo que deve-se questionar o seguinte: **porquê existe uma norma para certificar os *softwares* de simulação dinâmica e porquê a inclusão/requisito na aplicabilidade desta norma para grandes edifícios de serviços no RSECE?**

A resposta para a questão anterior tem por base que qualquer *software* introduz erros, ou nas aproximações que faz a própria metodologia de cálculo interna, ou por exemplo na introdução dos dados por parte do utilizador, pelo que a mesma uniformiza os desvios com origens no próprio *software* de simulação dinâmica, pelo que a importância e possíveis problemas que esta

temática apresentava e apresenta, a *ASHRAE* publicou a norma 140-2004. A mesma norma foi revista no ano 2007 e em 2010, gerando a norma *ASHRAE* 140-2007 e 140-2010 respectivamente.

O principal objectivo na criação da mesma, é possibilitar uma correcta avaliação das capacidades técnicas dos diferentes *softwares*, limitando quando aplicável as aplicações a que o mesmo está habilitado. Para isso, esta norma simulou e posteriormente reportou em forma gráfica vários casos distintos, como por exemplo, para diferentes tipos de inércia térmica interior, sendo os *softwares* testados com especificações e critérios adoptados e definidos na mesma. A norma *ASHRAE* 140-2004 é uma ferramenta de importância extrema, visto que a mesma permite ao utilizador saber de antemão se o *software* que vai utilizar é o mais indicado para o estudo que pretende realizar e se o mesmo tem as capacidades técnicas requeridas, permitindo a mesma norma após a simulação dinâmica, comparar directamente os resultados obtidos com os outros *softwares*, ajudando na validação dos mesmos ao quantificar e definir desvios máximos entre os *softwares* por caso de aplicação.

A introdução do **TRACE 700** e posteriormente a utilização dos resultados obtidos através da simulação dinâmica, teve como **objectivo principal** a validação dos resultados obtidos pelo *DesignBuilder*, recorrendo à norma 140-2004, comparando os dois *softwares* directamente, quantificando os desvios máximos aceitáveis pela mesma, de forma a permitir a validação dos resultados no DB.

5. Caso em estudo

5.1. Descrição geral

O edifício em estudo é o Edifício de Apoio/Comando da Central Hidroeléctrica do Baixo Sabor, escalão de Jusante, localizado no distrito de Bragança, concelho de Torre de Moncorvo. Este edifício contempla toda a instalação referente à parte de comando e controlo da Central e ao mesmo tempo está destinado a albergar alguns equipamentos que fazem parte das instalações auxiliares da Central Hidroeléctrica. No entanto, o objecto da presente tese limita-se à área estritamente dedicada aos serviços técnico-administrativos, estando, pois excluídas, todas as áreas técnicas e respectivos equipamentos.

O escalão de Jusante está situado, conforme atrás referido, no concelho de Torre de Moncorvo, distrito de Bragança, no troço inferior do Rio Sabor a 12,6 km da foz com o Rio Douro. O escalão de Jusante situa-se a poço mais de 3 km da foz do Rio Sabor conforme ilustra a figura 10.



Figura 10 - Vista de planta do Aproveitamento Hidroelétrico do Baixo Sabor, Escalão Jusante.

O edifício será inaugurado no segundo semestre do ano de 2014. As figuras seguintes pretendem ilustrar o aspecto do novo edifício que será, nesta tese, analisado e estudado a nível térmico e energético. Ao longo da tese são propostas medidas correctivas na constituição da envolvente, que poderiam ser incorporadas na fase de obra, no sentido de reduzir e otimizar os consumos energéticos futuros dos sistemas de climatização. É também realizada uma análise/comparação entre o sistema de AVAC proposto pela equipa de projecto e sistemas de climatização alternativos, com o objectivo de minimizar os consumos energéticos.

O edifício tem 2 pisos e apresenta uma planta rectangular (44mx8m) com o maior eixo desenvolvido na orientação nascente-poente, sendo a fachada principal voltada a Sul. Tem sensivelmente 8 metros de altura e uma área útil de pavimento de aproximadamente 300 m². A área útil de pavimento é definida como sendo a área calculada pelo perímetro interior, delimitada pelas paredes excluindo áreas técnicas, garagem e escadas de emergência (ADENE, 2008).

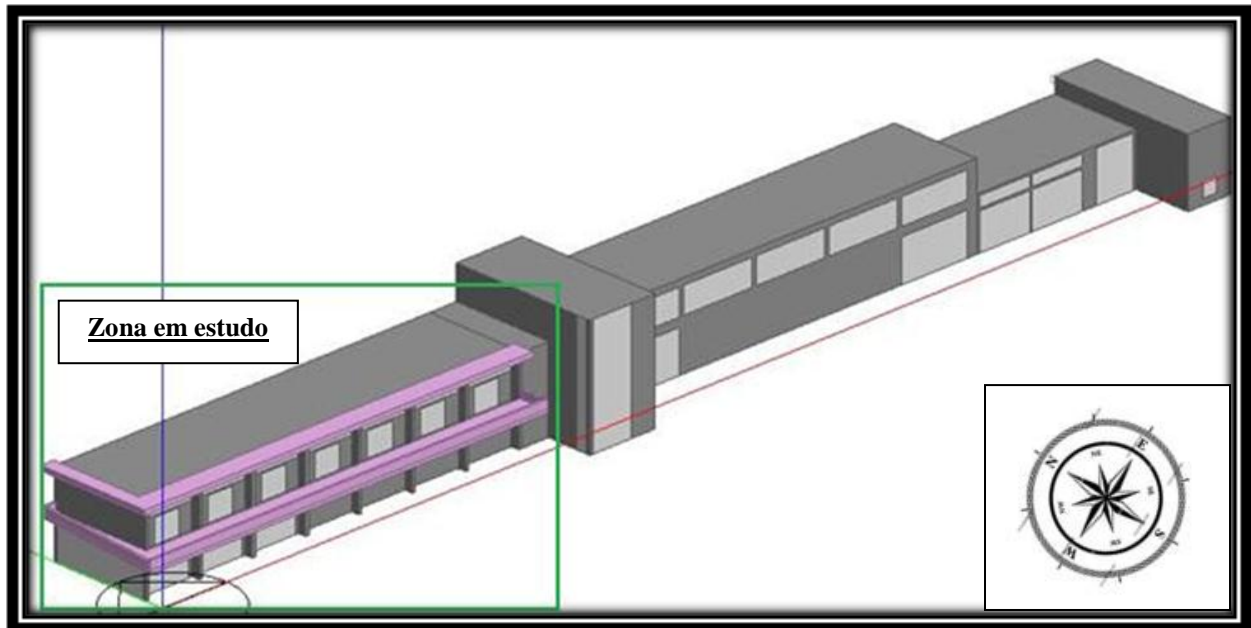


Figura 11 – Edifício de Comando da Central Hidroeléctrica de Baixo Sabor, Escalão de Jusante - [Software de modelação: Design Builder Versão 3].

O levantamento das áreas foi feito através do projecto da arquitectura disponibilizado (plantas, cortes e figuras 12 e 13) em suporte informático, com o auxílio do *software* AutoCAD®. O levantamento das áreas do edifício foi fundamental para o cálculo da inércia térmica, factor de forma e para o coeficiente τ , bem como para construir o modelo geométrico do edifício no software de simulação dinâmica *DesignBuilder* e Trace 700. A fachada principal, orientada a Sul, apresenta um total de 60 m² de área de envidraçados, protegidos por uma pala sombreadora, com uma projecção exterior de 1,2 metros face ao edifício.

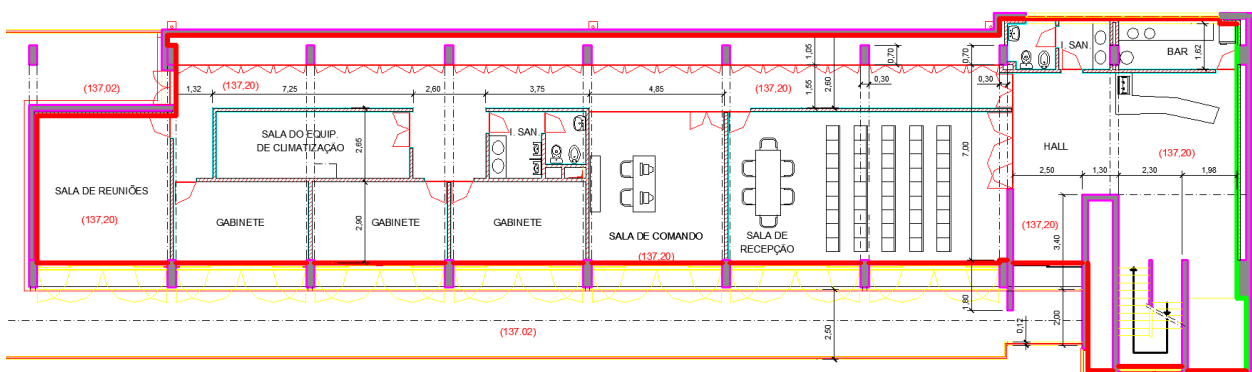


Figura 12 – 1º piso do edifício em estudo (Zona climatizada).

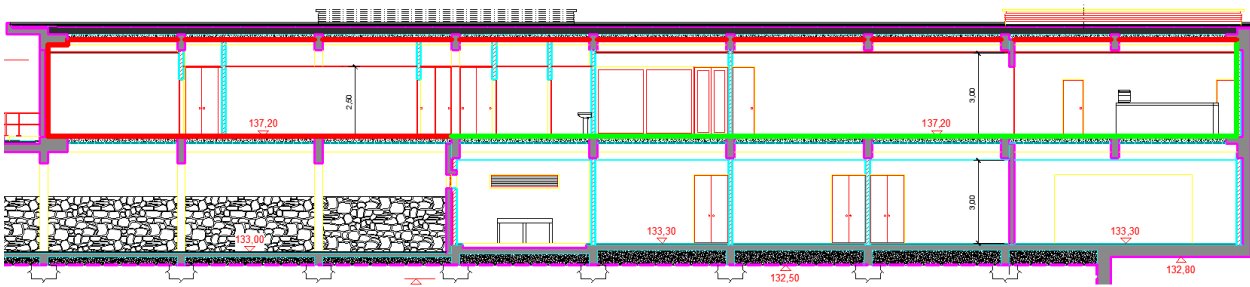


Figura 13 – Corte longitudinal do edifício em estudo.

Aquela pala promove um sombreamento total dos envidraçados durante a estação de arrefecimento, conforme se ilustra na figura 14.

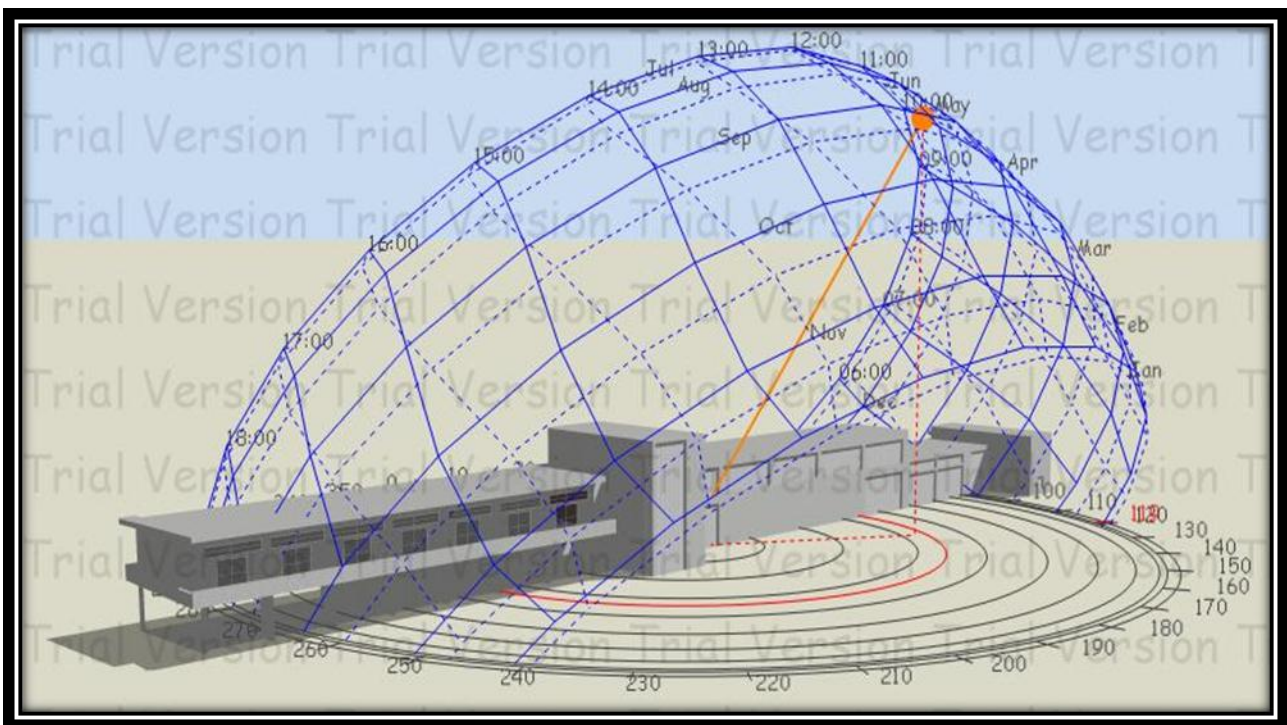


Figura 14 - Edifício de Comando da Central Hidroeléctrica de Baixo Sabor, Escalão de Jusante, com visualização do percurso solar (dia 21 de Julho às 10 da manhã) - [Software de modelação: Design Builder Versão 3 – Módulo: “Visualize”].

Foi efectuado e cedido pela equipa de projecto um levantamento dos equipamentos de iluminação e de todo o equipamento de AVAC previstos para o edifício, que contribuem de forma significativa para o consumo energético do mesmo. O levantamento da iluminação foi feita com base nas plantas cedidas em suporte informático, e as especificações do equipamento de AVAC foram obtidos também pela consulta de plantas cedidas e pela memória descritiva da instalação. A constituição de toda a envolvente também foi cedida pela equipa de projecto e reporta-se a plantas referentes à arquitectura/construção civil do edifício.

O levantamento de todos estes dados foi necessário para a construção, implementação e modelação da simulação energética dinâmica do edifício, bem como, dos diferentes sistemas de AVAC.

5.2. Caracterização Térmica do Edifício

5.2.1. Dados climáticos

A primeira abordagem ao edifício é feita do ponto de vista da sua envolvente física, quer para estabelecer adequadamente a sua fronteira, quer para proceder à respectiva caracterização térmica, designadamente os coeficientes de transmissão térmica, os factores solares dos envidraçados, classe de inércia, etc.

A qualidade térmica da envolvente e dos requisitos mínimos regulamentares a cumprir não está, nem poderia estar, alheada do clima em que o edifício se insere. Daqui a necessidade, desde logo, da caracterização climática da zona/concelho em que o edifício se insere e que se sintetiza na tabela seguinte.

Tabela 2 - Dados climáticos referente ao caso em estudo - [Fonte: RCCTE].

Concelho	Torre de Moncorvo
Altitude (m)	133.00
Zona climática Inverno	I ₃
Número de Graus-Dias (°C.dia)	2330
Duração da estação de aquecimento	8
Zona climática de Verão	V ₂ N
Temperatura externa de projecto (°C)	33
Amplitude térmica (°C)	15
Valor médio da temperatura do ar exterior – θ_{atm} (°C)	19
G_{SUL} (Kwh/m ² .mês) (estação de aquecimento)	90
G_{Norte} (Kwh/m ² .mês) (estação de arrefecimento)	200
G_{Este} (Kwh/m ² .mês) (estação de arrefecimento)	450
G_{Oeste} (Kwh/m ² .mês) (estação de arrefecimento)	450
G_{Sul} (Kwh/m ² .mês) (estação de arrefecimento)	420
$G_{Horizontal}$ (Kwh/m ² .mês) (estação de arrefecimento)	790

5.2.2. Envolvente

Em complemento, é realizada uma verificação dos requisitos de qualidade térmica da envolvente, conforme exigido pela regulamentação em vigor.

Para a caracterização térmica da envolvente do edifício foi tomado em consideração a publicação ITE50, do LNEC e, também, o RCCTE. Esta caracterização tem como base a avaliação da capacidade de transferência térmica do edifício, definida a partir de parâmetros como a resistência térmica R_t , coeficiente global de transferência térmica U (W/m².°C), massa superficial útil M_{si} (kg/m²) e inércia térmica I_t (kg/m²).

A análise às plantas de arquitectura/civil permitiu caracterizar do ponto de vista físico e térmico os elementos construtivos opacos (paredes, pavimentos e coberturas) e não opacos (envidraçados). O cálculo do coeficiente de transmissão térmica de cada elemento da envolvente pode ser consultado nos anexos da tese, anexo C1.

Tabela 3 - Resumo do cálculo dos CTTTP da envolvente.

Elemento da envolvente	U [W/(m ² .°C)]
Parede exterior	0.42
Parede interior	1.48
Pavimento interior (Verão – Fluxo Ascendente)	0.65
Pavimento interior (Inverno – Fluxo Descendente)	0.62
Cobertura (Verão – Fluxo Descendente)	0.68
Cobertura (Inverno – Fluxo Ascendente)	0.72
Vãos envidraçados	2.8
Pilares	0.78
Portas interiores	3.5
Portas exteriores	5.8

No caso dos envidraçados, o RCCTE em função da classe de inércia térmica e das diferentes zonas climáticas de Verão, define os valores para o factor solar máximo admissível. No caso em estudo, o factor solar do vidro é igual a 0.45.

5.2.3. Inércia Térmica

A inércia térmica interior de um edifício/espço ou capacidade térmica (ou capacidade de armazenamento e de restituição de calor) depende da **massa superficial útil por unidade de área útil de pavimento, I_t** , de cada um dos elementos de construção (paredes, pavimentos, coberturas) que o constituem.

Em função do valor de I_t o regulamento (vd. RCCTE, Anexo VII, Quadro VII.6) define três classes de inércia térmica, conforme indicada na tabela seguinte:

Tabela 4 - Classes de inércia térmica de acordo com o RCCTE.

Classe de inércia	Massa superficial útil por unidade de área útil de pavimento, I_t (kg/m ²)
Fraca	$I_t < 150$
Média	$150 \leq I_t \leq 400$
Forte	$I_t > 400$

A massa superficial útil por unidade de área útil de pavimento, I_t , é calculada a partir da massa superficial útil, M_{si} , de cada elemento de construção exterior ou interior ao edifício/espço e depende da massa total por unidade de área de cada elemento construtivo (m_t) e, ainda, dos seguintes factores:

- Da sua localização no edifício (em contacto com o ambiente exterior, com espaços não-úteis, com outras fracções autónomas ou com o terreno; ou no interior da fracção autónoma);
- Da sua própria massa superficial e da sua constituição, nomeadamente do posicionamento de uma eventual **solução de isolamento térmico** (interior, exterior ou intermédia);
- Das características térmicas do respectivo **revestimento superficial interior**.

Em função daqueles factores o regulamento estabelece (vd. RCCTE, Anexo VII, capítulo 2) o modo de contabilização (ou os valores máximos a considerar) da massa superficial útil, **M_{si}**, de um grande número de elementos construtivos correntes.

Na tabela seguinte apresentam-se os valores máximos de M_{si} a considerar em função de três casos genéricos de localização dos elementos de construção no edifício ou espaço:

- Elementos em contacto com o ambiente exterior, outras fracções autónomas ou espaços não-úteis (EL1);
- Elementos em contacto com o solo (EL2);
- Elementos de compartimentação interior da fracção autónoma em estudo (EL3).

Tabela 5 - Valores máximos da massa superficial útil (M_{si}) em função da localização no edifício dos elementos de construção [Fonte: RCCTE].

Localização dos elementos de construção no edifício	Valores máximos de M _{si} (kg/m ²) a considerar no cálculo de I _t	
	Com Isolamento(*)	Sem Isolamento
EL1 - Elemento da envolvente exterior, em contacto com outra fracção autónoma ou com espaços não úteis	M _{si} = m _i e M _{si} ≤ 150	M _{si} = m _t /2 e M _{si} ≤ 150
EL2 - Elementos em contacto com o solo.	M _{si} = m _i e M _{si} ≤ 150	M _{si} = 150
EL3 - Elementos de compartimentação interior da fracção autónoma em estudo (paredes e pavimentos interiores)		M _{si} = m _t e M _{si} ≤ 300

A constituição dos elementos de construção da envolvente e do posicionamento relativo das camadas de isolamento térmico (interior, exterior ou intermédia) condiciona a contabilização da sua massa superficial útil, estando alguns dos elementos mais comuns da envolvente representados esquematicamente no Anexo VII do RCCTE (Figuras VII.2 a VII.6).

De referir que se consideram **soluções de isolamento térmico** as camadas constituintes do elemento construtivo que proporcionam uma resistência térmica igual ou superior 0,30 m².°C/W.

As massas superficiais (**m_t**, ou **m_{pi}**) necessárias ao cálculo dos valores de **M_{si}** dos diversos elementos de construção foram obtidas na publicação do LNEC (ITE50).

No caso em estudo o valor da inércia térmica é igual a 560 kg/m² (Forte), sendo que área útil de pavimento calculada é igual a 300.3 m². O cálculo efectuado para quantificar a classe de inércia do edifício pode ser consultado nos anexos da tese, no anexo C2.

5.2.4. Coeficiente de redução das perdas térmicas para locais não aquecidos (τ)

As perdas térmicas de um elemento construtivo que separa o espaço útil do não útil são calculadas em função de um coeficiente τ (coeficiente de redução das perdas térmicas para locais não-aquecidos), que traduz a maior ou menor relação que o espaço não aquecido tem com o ambiente exterior.

A determinação do valor de τ é feita a partir da Tabela IV.1 do RCCTE, que pode ser visualizada em baixo, em função do tipo de espaço não útil e da relação entre as áreas dos elementos que separam os dois espaços e a dos elementos que separam o espaço não útil do exterior.

No caso em estudo apenas o primeiro piso do edifício é considerada área útil, sendo o rés-do-chão e a ala Nascente áreas técnicas considerados áreas não úteis, pelo que se procedeu à determinação dos coeficientes τ que caracterizam aqueles espaços, e que assume o valor de 0.95.

Tabela 6 - Valores do coeficiente τ para diferentes tipos de tipologia [Fonte:RCCTE].

Tipo de espaço não útil	$A_i / A_e (\%)$		
	De 0 a 1	De 1 a 10	Maior que 10
1 — Circulação comum:			
1.1 — Sem abertura directa para o exterior.....	0,6	0,3	0
1.2 — Com abertura permanente para o exterior (por exemplo, para ventilação ou desenfumagem):			
a) Área de aberturas permanentes/volume total < 0,05 m ³ /m ³	0,8	0,5	0,1
b) Área de aberturas permanentes/volume total ≥ 0,05 m ³ /m ³	0,9	0,7	0,3
2 — Espaços comerciais	0,8	0,6	0,2
3 — Edifícios adjacentes	0,6	0,6	0,6
4 — Armazéns	0,95	0,7	0,3
5 — Garagens:			
5.1 — Privada	0,8	0,5	0,3
5.2 — Colectiva	0,9	0,7	0,4
5.3 — Pública	0,95	0,8	0,5
6 — Varandas, marquises e similares (*)	0,8	0,6	0,2
7 — Coberturas sobre desvão não habitado (acessível ou não) (*):			
7.1 — Desvão não ventilado	0,8	0,6	0,4
7.2 — Desvão fracamente ventilado	0,9	0,7	0,5
7.3 — Desvão fortemente ventilado		1	

O cálculo dos coeficientes τ relativos aos espaços não úteis identificados, pode ser consultado nos anexos da tese, anexo C4.

5.2.5. Pontes térmicas

Uma ponte térmica plana é uma heterogeneidade inserida em zona corrente da envolvente exterior ou da envolvente interior em contacto com espaços não úteis, tais como pilares, talões de viga e caixas de estore, por onde se considera uma perda térmica unidimensional por unidade de área de superfície. A ponte térmica plana é quantificada multiplicando o valor de U pela respectiva área (ADENE).

No caso em estudo, foi identificado pontes térmicas associadas a pilares, cuja caracterização térmica é apresentada na tabela seguinte.

Tabela 7 – Valor do coeficiente de transmissão térmica para a PTP (Pilar).

Envolvente opaca	U (W/m ² .°C)
PTP (Pilar)	0.78

Uma ponte térmica linear corresponde à ligação de dois elementos construtivos exteriores e é uma singularidade da envolvente em que o fluxo térmico é bidimensional, originando uma perda térmica por unidade de comprimento (Psi). A ponte térmica é quantificada multiplicando o valor de ψ pelo respectivo desenvolvimento (ADENE).

Não existindo desenhos elucidativos sobre pormenores de construção que permitissem quantificar as PTL, e conforme previsto na publicação da ADENE “Perguntas e Respostas sobre o RCCTE/RSECE”, as pontes térmicas lineares são contabilizadas através de um agravamento de 5% das necessidades energéticas em aquecimento. Ainda que esta situação esteja prevista, apenas, para os grandes edifícios de serviços, considerou-se uma boa aproximação.

5.2.6. Verificação dos requisitos regulamentares à envolvente

A envolvente opaca e não opaca de um edifício novo, deve cumprir com os requisitos mínimos de qualidade térmica, conforme estabelecido regularmente no âmbito do RCCTE, pelo que, a tabela 8 apresenta os coeficientes de transmissão térmica máximos admissíveis, para a envolvente opaca exterior, quer interior, isto é, em contacto com áreas não úteis.

O RCCTE determina também, que em função do coeficiente τ , podem existir espaços interiores com requisitos na sua envolvente idênticos aos máximos estabelecidos para a envolvente exterior. Assim, quando o valor do coeficiente τ de um espaço não útil for superior a 0.7, é exigida que a envolvente que contacta com áreas não úteis cumpra com os requisitos de envolvente exterior.

Em complemento, estabelece ainda que as zonas heterogéneas de uma envolvente (PTP), para além de cumprirem com o valor máximo estabelecido, não podem ultrapassar o dobro do valor do coeficiente de transmissão térmico do elemento corrente em que se inserem.

Tabela 8 - Coeficientes de transmissão térmica superficiais máximos admissíveis de elementos opacos
[Fonte: RCCTE].

Elemento da envolvente	(U-W/m ² °C)		
	Zona climática (*)		
	I ₁	I ₂	I ₃
Elementos exteriores em zona corrente (**):			
Zonas opacas verticais	1,8	1,60	1,45
Zonas opacas horizontais	1,25	1	0,90
Elementos interiores em zona corrente (***):			
Zonas opacas verticais	2	2	1,90
Zonas opacas horizontais	1,65	1,30	1,20

Para além dos valores máximos admissíveis para os coeficientes de transmissão térmica o RCCTE determina, ainda que, o valor do factor solar varia consoante a classe de inércia térmica do edifício e da zona climática onde aquele está inserido.

Tabela 9 – Factores solares máximos admissíveis de vãos envidraçados com mais de 5% da área útil do espaço que servem [Fonte: RCCTE].

Classe de inércia térmica interior	Zona climática		
	V1	V2	V3
Fraca	0.15	0.15	0.1
Média	0.56	0.56	0.5
Forte	0.56	0.56	0.5

Pela comparação entre os valores calculados dos coeficientes de transmissão térmica e do factor solar da envolvente do edifício e os respectivos valores máximos admissíveis, conclui-se que a envolvente se encontra regulamentar, conforme explicito na tabela 10 e 11.

Tabela 10 – Verificação regulamentar do RCCTE (Envolvente opaca).

Envolvente opaca	Coefficiente de transmissão térmica U (W/m ² .°C)	Valor máximo admissível para o coeficiente de transmissão térmica U (W/m ² .°C)	Cumpre?
Parede exterior	0.42	1.45	Sim
Cobertura	0.72	0.90	Sim
Pavimento	0.65	0.90	Sim
PTP (Pilar)	0.78	$U_{PTP} \leq 1.45$ e $U_{PTP} \leq 2 \times U_{PEXT} = 0.84$	Sim
Parede interior c/ requisito de parede exterior	0.42	1.45	Sim
Parede interior	(s/requisito)		
Portas	(s/requisito)		

Tabela 11 – Verificação regulamentar do RCCTE (Envolvente não opaca).

Envolvente não opaca	Factor solar	Valor máximo admissível para o factor solar	Cumpre?
Envidraçados	0.45	0.56	Sim

5.3. Condições de funcionamento

A par da caracterização da envolvente, é fundamental a caracterização das condições de utilização e funcionamento dos diferentes parâmetros, que influenciam, quer os respectivos consumos de energia, quer o balanço térmico do edifício, nomeadamente: ocupação, iluminação e equipamentos.

Na sequência da publicação da Directiva Europeia 2002/91/CE de 16 de Dezembro relativa ao desempenho energético dos edifícios, transcrita para a legislação Nacional pelos Decretos-Lei nºs 78, 79 e 80 de Abril de 2006, foram definidos valores máximos de consumo energético para as diferentes tipologias de utilização, acima dos quais os edifícios não podem ser licenciados. Os consumos energéticos para efeitos de licenciamento e atribuição da classe de eficiência têm de ser calculados em “*condições nominais de funcionamento*” que estão definidas no Decreto-lei 79/2006 e convertidos para unidades de energia primária (utilizando coeficientes de conversão definidos no mesmo decreto). As condições nominais de funcionamento definidas no Decreto-lei 79/2006 foram utilizadas na simulação dinâmica relativas à ocupação, iluminação e aos equipamentos e são apresentados para consulta no capítulo dos anexos da tese, anexo C7.

A potência referente aos ganhos de ocupação foi definida pela base de dados dos programas de simulação e que tem como base a *ASHRAE Fundamentals*. Para edifícios de escritórios considerando uma actividade sedentária, os ganhos internos por ocupante são:

- 75W de carga sensível,
- 55W de carga latente.

De referir que, da carga sensível, 58% do calor trocado é por radiação.

Relativamente aos equipamentos e de acordo com as plantas, foram obtidos os valores de densidade de potência instalada para os diferentes espaços apresentados na tabela seguinte:

Tabela 12 – Densidade de potência dos equipamentos nos diferentes espaços climatizados.

Espaço	Densidade de potência dos equipamentos (W/m ²)
Sala de Comando	10
Sala de Reuniões	5
Gabinete 1	9
Gabinete 2	9
Gabinete 3	9
Auditório	3

A quantidade de calor que é trocada por radiação corresponde a 40% do total de acordo com a *ASHRAE Fundamentals 2005*.

Em relação às iluminárias verificou-se que todas as lâmpadas utilizadas eram do tipo fluorescente. A potência de iluminação dos diferentes espaços é apresentada na tabela 13.

Tabela 13 – Densidade de potência de iluminação nos diferentes espaços climatizados.

Climatizado	Espaço	Densidade de potência de iluminação (W/m ²)
Sim	Sala de Comando	9.6
Sim	Sala de Reuniões	15.0
Sim	Gabinete 1	9
Sim	Gabinete 2	9
Sim	Gabinete 3	9
Sim	Auditório	17.3
Não	Estacionamento	4
Não	Sala das baterias	5.7
Não	Sala dos quadros	9.5
Não	Sala do quadro de 30 kV	9.5
Não	Sala dos rectificadores	11.8
Não	Corredor	12.1

O cálculo detalhado da densidade de potências da iluminação pode ser consultado nos anexos da tese, anexo C6.

Como boa prática, e também de acordo com os manuais do *Energy Plus*, o “motor” de cálculo do *DesignBuilder*, deve considerar-se 40% para a componente radiativa de lâmpadas fluorescentes, sendo que 20% são na gama do visível e os outros 20% na gama do infravermelho.

Em relação ao número de ocupantes foi utilizada a densidade de ocupação prevista no RSECE (15 m²/ocupante - Tipologia escritórios) para os gabinetes, visto não se saber a ocupação real que estes espaços poderão ter. Nos restantes, utilizou-se o que consta no caderno de encargos do cliente.

Tabela 14 – Número de ocupantes nos diferentes espaços climatizados.

Espaço	Número de ocupantes
Sala de Comando	5
Sala de Reuniões	5
Gabinete 1	1
Gabinete 2	1
Gabinete 3	1
Auditório	40

5.4. Caracterização e condições de funcionamento do sistema de AVAC

A climatização do edifício é caracterizada por um sistema “tudo-ar” para o auditório e para a sala de reuniões e de comando, composto por uma UTAN no caso do auditório e uma UTA com recuperação de calor para a sala de comando e reuniões. Nos três gabinetes um sistema “ar-água” constituído por VC’s a dois tubos (aquecimento ou arrefecimento) complementados por pequenas unidades de ventilação, servindo apenas para introdução de ar novo e extracção do ar nos gabinetes.

O sistema produtor de energia térmica é uma bomba de calor reversível para produção de água quente de condensação ou refrigerada a água. A água do circuito de condensação é proveniente de um reservatório. O sistema proposto permite proceder ao arrefecimento e aquecimento em simultâneo, fazendo uso de parte da recuperação de calor da água de condensação da bomba de calor. No entanto, tal particularidade está dirigida apenas para o auditório, que como veremos no capítulo “Resultados” é o único espaço que necessitará de arrefecimento durante praticamente todo ano, tendo que o sistema se adaptar a este facto e proceder durante parte do ano ao arrefecimento e aquecimento em simultâneo.

O esquema de princípio hidráulico que elucida o que foi dito no parágrafo anterior pode ser consultado nos anexos da tese, anexo C9.

Os valores da temperatura e humidade, quer exteriores, quer interiores previstas em projecto foram as que constam no caderno de encargos do cliente, designadamente:

Tabela 15 - Condições interiores e exteriores de projecto.

Condições	Inverno		Verão	
	Temperatura de bolbo seco (°C)	Humidade absoluta (g/kg ar seco)	Temperatura de bolbo seco (°C)	Humidade absoluta (g/kg ar seco)
Dados climáticos	3.5	2	32	11
Condições interiores de conforto nos espaços climatizados	20	7	25	10

Nas tabelas que se seguem, encontram-se algumas das condições de funcionamento do sistema de AVAC que, a par dos perfis de utilização, foram introduzidas nos programas de simulação dinâmica em vista à sua parametrização:

Tabela 16 - Temperaturas limite de operação dos Vc’s – Gabinetes.

Temperatura limite de insuflação (°C)	
Máximo	27
Mínimo	18

Tabela 17 - Horário de funcionamento dos Vc's – Gabinetes.

Horário do sistema	Estado
Das 0:01 às 7:00	Desligado
7:01 às 20:00	Ligado
20:01 às 0:00	Desligado

O caudal mínimo de ar novo necessário para cada espaço foi estipulado de acordo com o RSECE. Considerou-se uma $E_v = 0,8$ e que estamos na presença de MEL. A tabela seguinte sintetiza os caudais de ar novo mínimos de acordo com as exigências regulamentares e os pressupostos apresentados:

Tabela 18 - Caudais de ar novo dos diferentes equipamentos.

Equipamento	Caudal mínimo de ar novo (m ³ /h)
UTA (Sala de Comando e Reuniões)	842
UTAN (Auditório)	1803
UV + VC's	272

Relativamente às temperaturas limite de insuflação, foi considerado para o Inverno e Verão um diferencial térmico não superior a 2°C, relativamente às temperaturas interiores de conforto consideradas e apresentadas na tabela 19.

Tabela 7 - Temperaturas limite de operação das UTA e UTAN – Sala de Comando e reuniões e auditório.

Temperatura limite de insuflação (°C)	
Aquecimento	22
Arrefecimento	23

Tabela 20 – Horário de funcionamento da UTA e UTAN.

Horário do sistema	Estado
Das 0:01 às 7:00	Desligado
7:01 às 20:00	Ligado
20:01 às 0:00	Desligado

Para dar uma melhor caracterização do sistema de climatização base, é apresentado nos anexos, anexo C8, o esquema aerúlico e respectivos equipamentos de difusão do ar, a unidade produtora de energia térmica, as unidades responsáveis pela distribuição do ar nos diferentes espaços e respectiva rede de condutas.

Deve-se referir ainda que, no caso da UTA que serve a sala de comando, esta funcionará 24h por dia (segunda a domingo), pelo que, foi projectado o funcionamento da mesma para o aproveitamento em condições de "free-cooling", isto é, do potencial de arrefecimento do ar exterior para promover a climatização do espaço sem recorrer a qualquer tratamento térmico adicional.

6. “Eficiência energética do sistema AVAC e do edifício – Enquadramento das medidas de eficiência energética com os sistemas propostos e o sistema base de climatização – Resumo das medidas adoptadas”

O âmbito da presente tese passa pelo estudo do sistema base e de sistemas alternativos de climatização, com o intuito de minimizar as necessidades energéticas dos mesmos e do edifício em estudo. O estudo basicamente poderá ser dividido em duas vertentes, conforme foi referido anteriormente, uma parte referente à envolvente do edifício e outra aos sistemas de climatização.

Ao nível do edifício será otimizada a envolvente, como por exemplo a espessura de isolamento ideal a colocar nas paredes exteriores e cobertura, ou por exemplo comprovar o facto de uma maior inércia térmica (***no caso em estudo forte – e onde deve ser colocado o isolamento, pelo interior ou exterior***) ser benéfica em termos do desempenho térmico e energético do edifício ao permitir, por um lado um melhor aproveitamento dos ganhos úteis na estação de aquecimento (Inverno) e, por outro lado, minimizar o risco de sobreaquecimento indesejado durante a meia estação e a estação de arrefecimento (Verão).

Nos sistemas de climatização irão ser estudadas e posteriormente analisados do ponto de vista da sua viabilidade económica, soluções que fomentem o aumento da sua eficiência energética, como por exemplo, a utilização de *chiller* de absorção para produção de água fria operando em conjunto com um sistema de solar térmico que forneça a energia térmica necessário ao *chiller* e

um sistema solar fotovoltaico que forneça a energia eléctrica necessária para os consumos do próprio *chiller*, bem como das bombas de circulação do circuito primário e secundário.

As melhorias que irão ser propostas para a envolvente do edifício, como por exemplo, o aumento da espessura de isolamento na cobertura do edifício, com vista à sua optimização, servirão de base à comparação dos sistemas de climatização, com o propósito de compará-los nos mesmos pressupostos de desempenho térmico do edifício. As estratégias e soluções apresentadas para cada sistema de AVAC proposto é que os diferenciam em termos de eficiência energética.

De salientar e conforme será possível constatar no capítulo seguinte que, a iluminação interior do edifício tem um peso considerável nos consumos energéticos finais do mesmo, pelo que complementarmente, é dada uma atenção especial a este consumidor, sendo feita uma análise no capítulo 16 “Considerações Finais” sobre a influência de um comando e controlo neste consumidor, aliada a um aumento da iluminação natural, com o propósito de reduzir ao máximo os consumos energéticos do edifício. Para fomentar e mostrar os benefícios do uso mais regular da iluminação natural do edifício (“*Daylighting*”), serão propostas condições que permitam a entrada de luz solar com o objectivo de iluminar os espaços naturalmente, sem prejudicar o conforto dos seus ocupantes, sendo novamente utilizado o *software* de simulação dinâmica *DesignBuilder*, no módulo “*Daylighting*”.

Outro aspecto importante é o estudo que é feito na perspectiva do conforto térmico espectável nos diferentes espaços do edifício versus as diferentes soluções para os sistemas AVAC. Através dos resultados obtidos do *software* de simulação dinâmica, serão estudadas algumas hipóteses para valores diferentes de temperatura operativa para cada espaço ou zona que induzam a um grau de insatisfação aceite pela norma **ISO-7730, com o propósito de reduzir o diferencial entre a temperatura interior e a exterior levando a uma poupança, quer energética, quer na potência dos equipamentos.**

Antes de introduzir o capítulo referente aos resultados, convém fazer uma síntese das principais medidas e estudos que foram realizados com o intuito de observar o seu impacto no consumo global do edifício. Para tal, é necessário dividir as medidas que visam melhorar o comportamento térmico e energético do próprio edifício e as que contemplam o sistema AVAC. As medidas com maior relevo estão referidas a seguir e o seu impacto foi estudado e encontra-se reportado no capítulo dedicado aos resultados da presente tese, sendo que a viabilidade económica e análise dos resultados é feita, respectivamente, nos capítulos referente à viabilidade económica e nas conclusões da tese.

Medidas que visam garantir um melhor comportamento térmico e energético do edifício:

- Optimização da envolvente opaca e não opaca do edifício. Na envolvente opaca foram avaliados, por exemplo o impacto do nível de isolamento térmico, bem como a escolha das características (reflectividade, emissividade e cor) e do tipo de material de revestimento. Na envolvente não opaca, designadamente nos vãos envidraçados, foi estudado a possibilidade da implementação de vidros que apresentam uma elevada resistência térmica pela combinação de vidros duplos com múltiplas camadas de baixa

emissividade, com o preenchimento da câmara-de-ar com gás de baixa conductividade térmica (árgon ou cripton), e usando espaçadores isolantes nos caixilhos, assim como a constituição dos mesmos tenham baixa condutividade térmica (por exemplo: policloreto de vinil ou o alumínio com corte térmico) para minimizar as pontes térmicas da fenestração. Uma adequada envolvente opaca e não opaca é de extrema importância pois permite “controlar” ou limitar os ganhos solares no Verão e maximizar os mesmos no Inverno, permitindo limitar as potências de aquecimento/arrefecimento dos sistemas de climatização.

- Estudo do impacto da inércia térmica do edifício, efectuando-se uma comparação entre uma classe de inércia fraca e forte;
- Estudo do sombreamento solar, potenciando os ganhos solares no Inverno e reduzi-los no Verão foi a estratégia dominante para melhorar o comportamento térmico do edifício. Assim, o edifício apresenta uma fachada virada exactamente a Sul, que constitui o principal elemento de “captação solar” e de aquecimento gratuito do interior através da envolvente exterior, mas que deve ser cuidadosamente controlado por forma a mitigar ganhos excessivos no Verão.
- Redução da utilização da iluminação artificial, privilegiando a iluminação natural “*Daylighting*” com introdução de clarabóias ou “poços de luz” na cobertura “*Skylite*”. Não sendo o âmbito da presente tese o estudo da iluminação natural, fez-se uma análise sumária da mesma, integrada com controlo da iluminação artificial nas considerações finais da presente tese.

Medidas que visam garantir uma redução face ao comportamento energético do sistema AVAC base:

- Redução das infiltrações e/ou renovações mecânicas de ar aos mínimos necessários para assegurar a qualidade de ar no interior. A nível das infiltrações e a fim de evitá-las, todos os espaços são ligeiramente pressurizados;
- Todos os propulsores de fluidos terem motores eléctricos de alto rendimento com classificação mínima EFF2 ou superior, bem como da adopção de variadores electrónicos de velocidade que permitam a optimização do período de funcionamento do sistema de ventilação e bombagem; Controlo do caudal de ar e água em função das necessidades.
- Estudo da viabilidade do arrefecimento nocturno do edifício “*Free-cooling*” e controlo da temperatura nos períodos de não ocupação;
- Na iluminação artificial adopção de equipamento eficiente: lâmpadas de alto rendimento, balastos electrónicos, armaduras com reflexão elevada e equipamento de controlo;
- Aumento da eficiência de ventilação;
- Estudo da possibilidade de aumentar/diminuir as temperaturas de conforto térmico e que permitam garantir uma mesma taxa de pessoas satisfeitas definida pela norma ISO 7730;
- Adopção de tecnologia radiativa de baixa temperatura para os sistemas locais de climatização, como o caso dos tectos arrefecidos e pisos aquecidos;
- Recuperação de energia térmica, com equipamentos de recuperação de calor com rendimentos altos (70% a 80%);

- Escolha dos equipamentos produtores de energia térmica com melhor eficiência energética;
- Adaptar o controlo do sistema de AVAC o máximo possível à tipologia e perfil de uso do edifício com incidência em:
 - Arranque e paragem otimizados dos equipamentos;
 - Ajuste dos limites de temperatura nos termóstatos quando o edifício está desocupado;
 - Busca de economia de energia por controlo mais preciso (**controlo da entalpia**)
 - Adequar a operação dos produtores de energia térmica às cargas reais;
 - Redução dos consumos eléctricos em horas de ponta;
 - Deslastre cíclico, desligando equipamentos em determinados períodos de tempo, de acordo com um programa prévio de redução do uso de energia;

➤ **Sistema otimizado**

Tendo como base o sistema referido no ponto anterior, foram estudadas estratégias que permitissem que o mesmo se torne o mais eficiente possível. Para tal, foram introduzidas algumas alterações face ao sistema base, a saber:

- Meios de difusão do ar diferentes, que permitam um aumento da eficiência de ventilação, utilização de sistemas radiativos em detrimento de sistemas convectivos designadamente, para o arrefecimento tectos arrefecidos e para o aquecimento piso radiante;
- Otimização das temperaturas de conforto térmico, sempre em harmonia com a norma ISO 7730, de forma a baixar os diferenciais de temperatura existente entre o interior e o exterior;
- Dotar o sistema de recuperação de calor em todas as zonas;
- Aproveitamento directo de uma fonte quente disponível e gratuita que neste caso é a água de retorno do circuito de refrigeração das turbinas *Francis*⁶⁸ instaladas;
- Utilização de “*free-cooling*” em todos os equipamentos responsáveis pela difusão do ar nos diferentes espaços;
- Análise à possibilidade de se realizar arrefecimento nocturno (*night-cooling*) no Verão, com o objectivo de controlar a temperatura interior do edifício, minimizando a potência de arrefecimento necessária no arranque da unidade de arrefecimento, o *chiller*.

Os sistemas radiativos são utilizados em detrimento dos sistemas convectivos. No entanto, para garantir a remoção da carga em cada espaço, o tecto arrefecido pode não ser suficiente, visto que o mesmo garante potências de refrigeração entre os 60 a 80 W/m². Na hipótese de existirem espaços onde as potências de arrefecimento possam ser superiores a 60/80 W/m² na estação de arrefecimento, o sistema de introdução de ar novo terá dois objectivos, o de providenciar o caudal mínimo de ar novo e o de promover a remoção das cargas térmicas remanescentes do espaço.

➤ **Sistema VRF c/ condensação a ar**

Um dos sistemas alternativos analisado na presente tese é o sistema de expansão directa, do tipo VRF a dois tubos, constituído por unidades exteriores (compressor/evaporador) refrigeradas a ar e unidades interiores (evaporador). A comparação em relação aos outros sistemas de climatização propostos foi efectuada com base nas características reais de equipamentos fornecidas pelo fabricante do equipamento.

Para cumprir com os caudais de ar novo imposto pelo RSECE, é necessário um sistema auxiliar, pelo que foram integrados no sistema de ventilação dois recuperadores de calor, um dedicado às salas de comando, reuniões e os três gabinetes e o outro dedicado integralmente ao auditório.

➤ **“Green System”**

Esta proposta vai no sentido de propor um sistema de AVAC com um reduzido consumo de energia primária de origem fóssil, na tentativa de o aproximar do conceito de um edifício “NZEB”, sendo o principal objectivo proposto, reduzir ao máximo as emissões de CO₂ enviadas para a atmosfera.

Neste sentido a solução proposta caracteriza-se por:

- Aproveitamento da rejeição de calor do circuito de refrigeração da turbina para o aquecimento ambiente dos espaços;
- No arrefecimento é proposto a utilização de um *chiller* de absorção, complementado por um conjunto de colectores solares térmicos, auxiliados por uma caldeira a *pellets*, com o intuito de fornecer a energia térmica necessária para o funcionamento do *chiller* de absorção. Para aumentar a sustentabilidade do sistema, será também incorporado uma pequena central solar fotovoltaica, que permita fornecer a energia eléctrica necessária para o funcionamento dos equipamentos auxiliares (electrobombas) associados à caldeira e ao *chiller* de absorção.

Com o recurso ao programa SolTerm, será estimada a área de colectores necessária, e paralelamente o estudo da sua viabilidade económica.

O tratamento do ar nos espaços será idêntico ao descrito no sistema de climatização optimizado.

Nos anexos da tese é incorporado o esquema de princípio do sistema “Green System”, anexo C11.

7. As ferramentas da simulação energética dinâmica

Após a criação e parametrização dos modelos computacionais em *EnergyPlus (DesignBuilder)* e TRACE 700, foram realizadas diversas simulações de modo a otimizar a envolvente do edifício em estudo e dos diferentes sistemas de climatização estudados. A optimização da envolvente foi estudada com incidência sobre o caso base, sendo os restantes casos analisados com base na incorporação daquela optimização ao nível do edifício.

Face à diversidade de *softwares* de simulação e uma vez que o estudo seria alicerçado numa ferramenta que até então desconhecia, como forma de validar inicialmente os resultados propus-me a fazer a comparação entre os valores obtidos com o *DesignBuilder*, e com a ferramenta que já me era familiar, o Trace 700, tomando como base os intervalos de desvios máximos espectáveis entre estes dois programas através da consulta da norma ASHRAE 140-2004.

Conforme foi dito no capítulo anterior, o estudo e análise dos resultados das diferentes medidas ou estratégias adoptadas, que visaram melhorar o comportamento térmico-energético do edifício e dos seus sistemas, podem ser divididas em duas vertentes, a primeira relacionada com a envolvente do edifício e a segunda referente aos sistemas de climatização.

7.1. Comparativo entre o *DesignBuilder* e o TRACE 700 – Norma ASHRAE 140-2004

No presente caso em estudo foi feita a simulação dinâmica do edifício com recurso aos *softwares* TRACE 700 e o *DesignBuilder*. O objectivo desta comparação não tem a intenção de avaliar os dois *softwares*, mas sim de validar as duas simulações e tornar o mais real possível a modelação

numérica, sendo que para tal fez-se uma análise dos resultados através da norma *ASHRAE 140-2004*, comparando os valores obtidos com os desvios máximos espectáveis que podem ocorrer entre os dois *softwares*.

Para uma abordagem inicial, é feita uma comparação entre os dois programas sem introduzir qualquer sistema de climatização, de forma a validar os resultados das cargas térmicas referentes única e exclusivamente à envolvente do edifício.

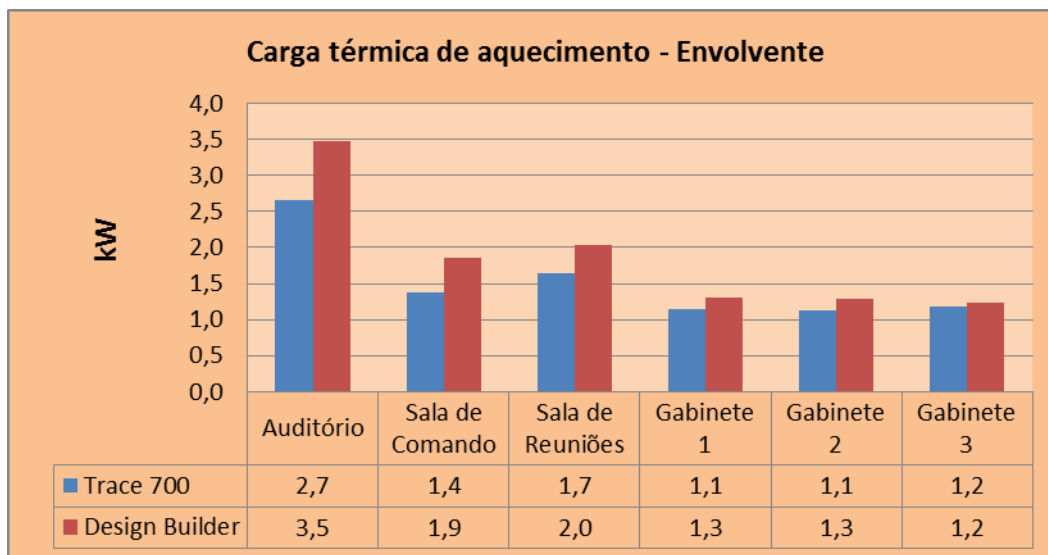


Gráfico 3.1 - Valores obtidos através dos dois *softwares* de simulação dinâmica para a carga térmica de aquecimento referente à envolvente do edifício.

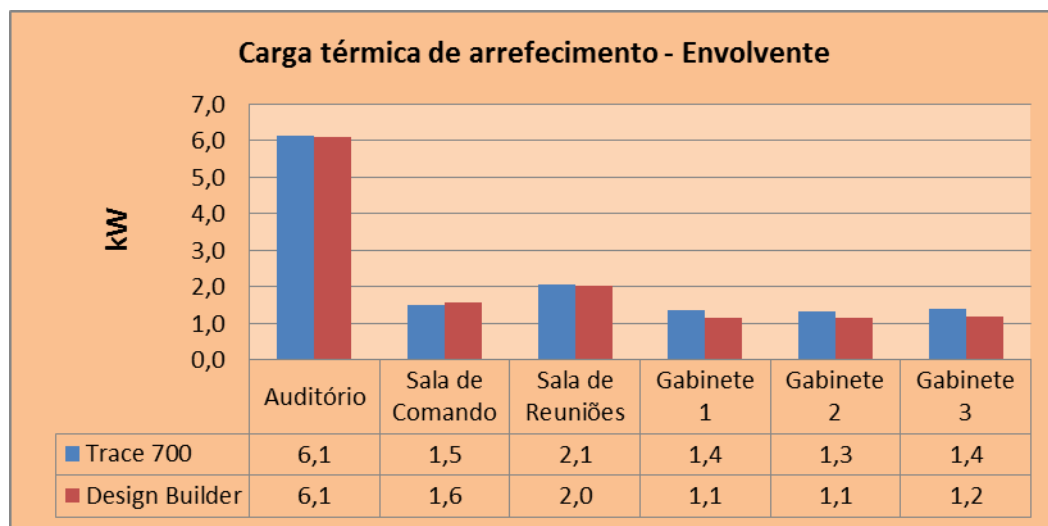


Gráfico 3.2 – Valores obtidos através dos dois *softwares* de simulação dinâmica para a carga térmica de arrefecimento referente à envolvente do edifício.

Daquela comparação resulta que os valores **das cargas térmicas referentes à envolvente** do edifício na estação de aquecimento e arrefecimento apresentam um desvio máximo entre os dois *softwares* de **23 e 15%**, respectivamente.

Com a introdução do sistema base de climatização e respectiva parametrização dos seus equipamentos e modos de funcionamento, descrito no capítulo 5 – “Caso em estudo”, o valor das necessidades energéticas do edifício e dos seus sistemas energéticos é apresentado no gráfico 3.3 e 3.4.

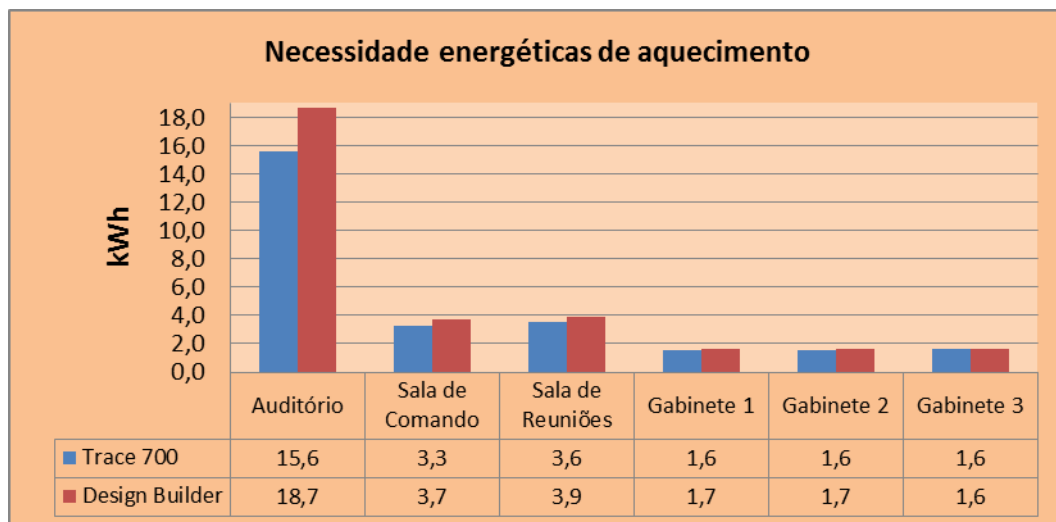


Gráfico 3.3 – Valores obtidos através dos dois *softwares* de simulação dinâmica para as necessidades energéticas de aquecimento.

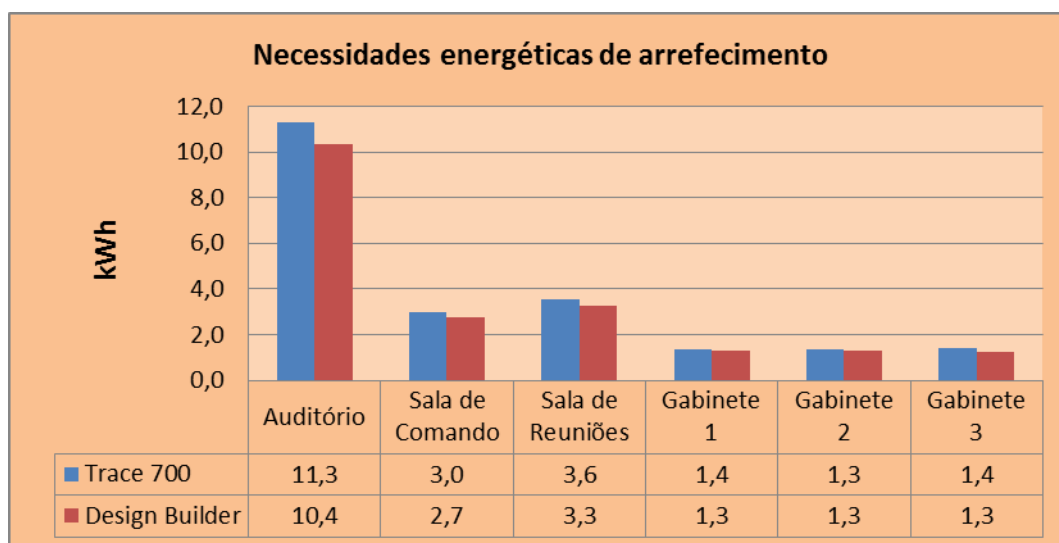


Gráfico 3.4 – Valores obtidos através dos dois programas de simulação dinâmica para as necessidades energéticas de arrefecimento.

Face aos resultados obtidos referentes às necessidades energéticas, conclui-se que o desvio entre os dois *softwares* é igual a 16.7% e 8% para o aquecimento e arrefecimento, respectivamente, adivinhando-se o mesmo, no que concerne aos consumos energéticos do edifício numa base anual.

Relativamente aos consumos energéticos obtidos das duas simulações energéticas efectuadas, que se referem **unicamente a consumos de electricidade**, por ser a única fonte energética utilizada. A parcela referente ao **sistema de climatização** engloba as parcelas do aquecimento,

arrefecimento, humidificação, bombagem e ventilação, conforme é apresentado no gráfico seguinte, em que ilustra os pesos percentuais das parcelas atrás referidas no consumo energético anual do sistema de climatização base.

Para uma melhor percepção da distribuição dos consumos eléctricos do edifício dos principais consumidores, é apresentado o gráfico 3.5 que desagrega o consumo energético do sistema de AVAC do edifício.

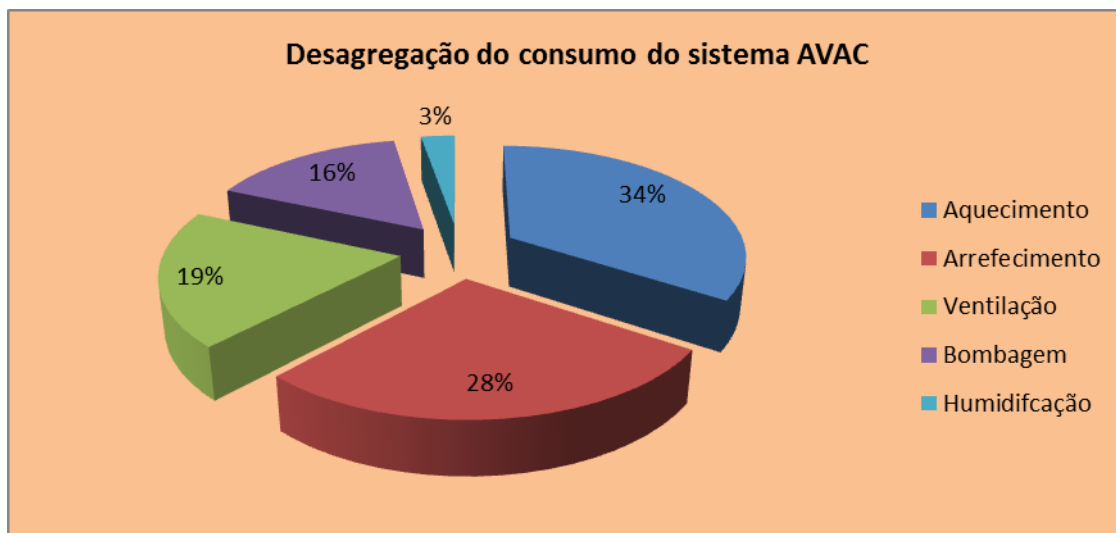


Gráfico 3.5 - Desagregação do consumo eléctrico anual do sistema de climatização base – *DesignBuilder*

Desagregando por exemplo, **na simulação recorrendo ao DB**, a parcela correspondente **ao sistema de AVAC**, verifica-se que o seu peso percentual no consumo energético global do edifício **é a igual a 47%**, valor este muito semelhante no caso do TRACE 700.

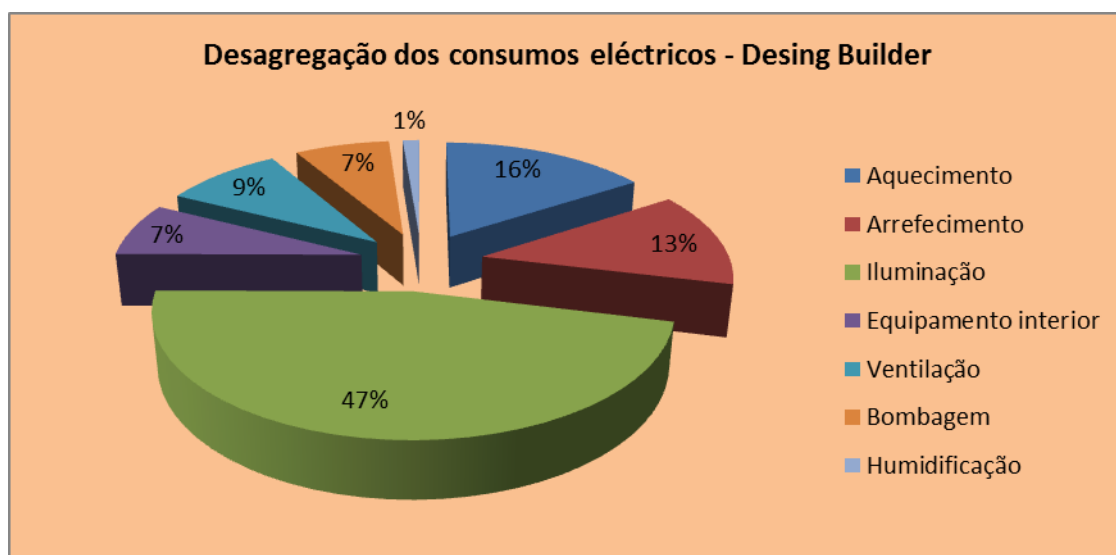


Gráfico 3.6 – Desagregação do consumo eléctrico anual do edifício – *DesignBuilder*.

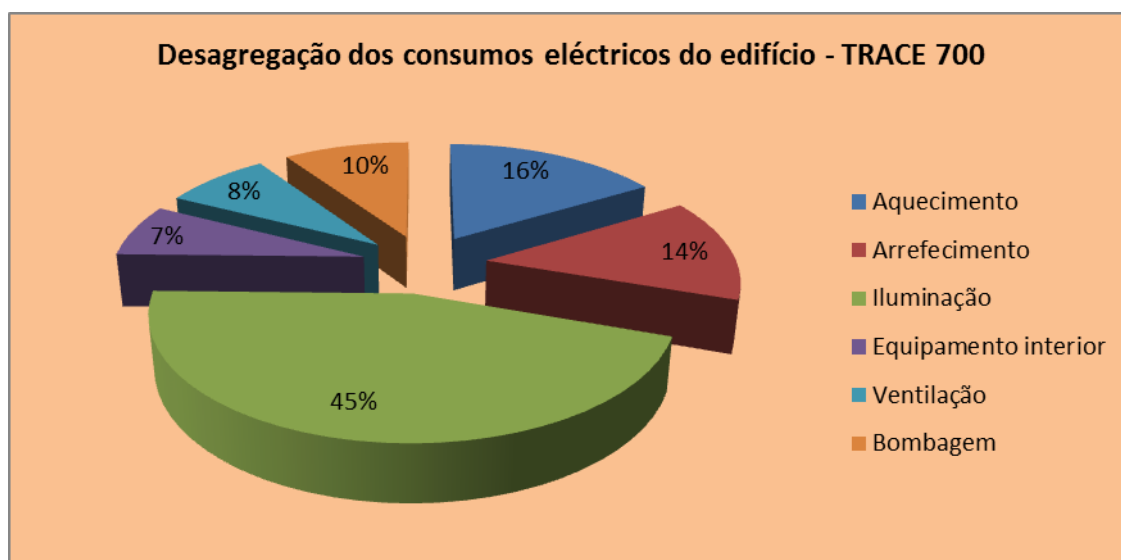


Gráfico 3.7 – Desagregação do consumo eléctrico anual do edifício – Trace 700

Os consumos eléctricos anuais do edifício são desagregados numericamente na tabela 21, tendo como objectivo principal, o de realçar os desvios entre as duas simulações por parcela própria do consumo energético total do edifício, permitindo, assim quantificar os maiores desvios por parcela e obter uma relação com os desvios máximos espectáveis entre os programas através da norma *ASHRAE* 140-2004.

Tabela 21 – Desagregação do consumo eléctrico anual do edifício e respectivos desvios entre as 2 simulações.

Software	Aquecimento (kWh)	Arrefecimento (kWh)	Iluminação (kWh)	Equipamento interior (kWh)	Bombagem (kWh)	Rejeição de calor (kwh)	Humidificação (kwh)	Ventilação (kwh)	Consumo Global (kwh)
<i>Design Builder</i>	7140.8	5813.5	20878.5	3290.9	2535.3	744.1	570.1	4071.6	45044.7
Trace 700	7583.5	6429.7	20878.5	3290	4426.9			3701.5	46311
Desvio	5.8%	10.6%	-	-	15%			11%	2.7%

A norma *ASHRAE* 140-2004, quantifica os desvios máximos espectáveis entre os dois *softwares*, pelo que consultando os valores obtidos no desvio entre os dois *softwares* verifica-se um desvio percentual no consumo eléctrico anual do edifício igual a **2.7%**.

É ainda importante os desvios ocorridos nos consumos eléctricos desagregados, especialmente no que diz respeito às necessidades energéticas de aquecimento e arrefecimento.

Os desvios espectáveis pela norma *ASHRAE* 140-2004, entre diferentes programas de simulação dinâmica, para casos de estudo distintos que são representados nos gráficos 4.1, 4.2, 4.3 e 4.4. A base de comparação foi o caso 910, correspondendo a uma fracção com inércia térmica forte e orientado a sul, com dois vãos envidraçados sombreados por uma pala com projecção

horizontal de 1 metro, sendo este caso de estudo da norma ASHRAE, a nível da orientação e sombreamento exterior do edifício, muito semelhante ao caso base estudado na presente tese, na medida em que todas as zonas estudadas partem praticamente dos mesmos pressupostos do “Case Study” da norma 140-2004.

Para as necessidades de aquecimento/arrefecimento e, para ser possível a comparação entre *softwares*, a norma ASHRAE 140 considera uma eficiência para os equipamentos de climatização igual a 1. A validação dos resultados obtidos para o *DesignBuilder*, é realizada com a mesma norma, no entanto, na versão do ano 2007, a ASHRAE 140-2007, pois este *software* foi criado mais recentemente do que o TRACE 700.

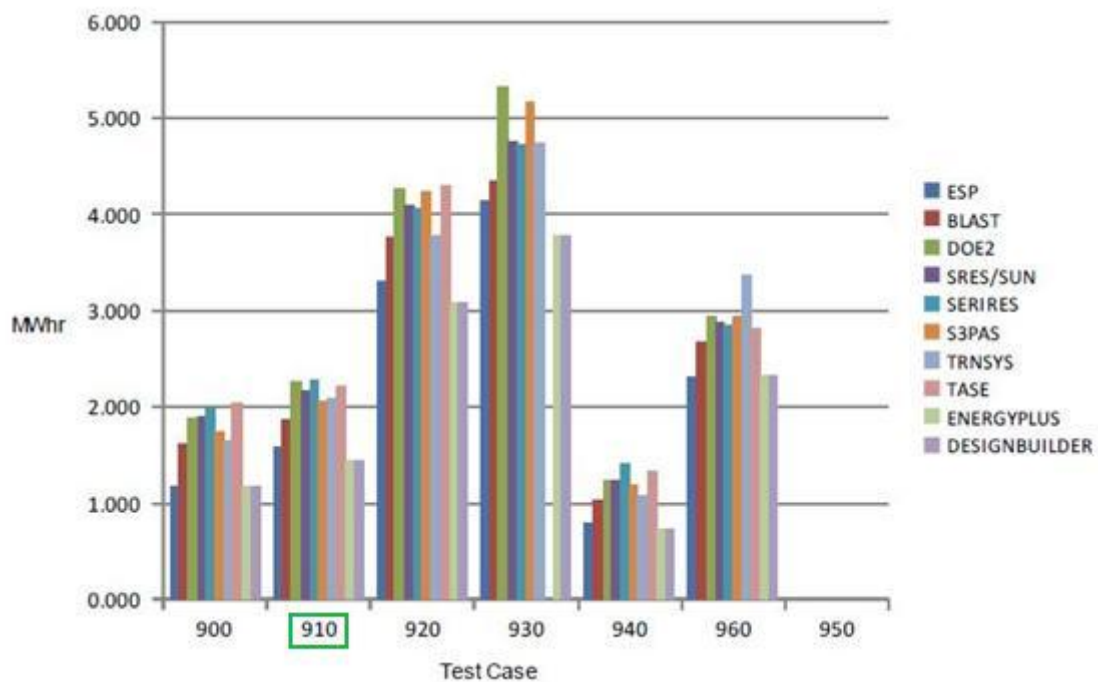


Gráfico 4.1 – Necessidades energéticas de aquecimento para os casos a que se remete – [Fonte: ANSI/ASHRAE Standard 140-2007 *Building Thermal Envelope and Fabric Load Tests – DesignBuilder Version 3.0*].

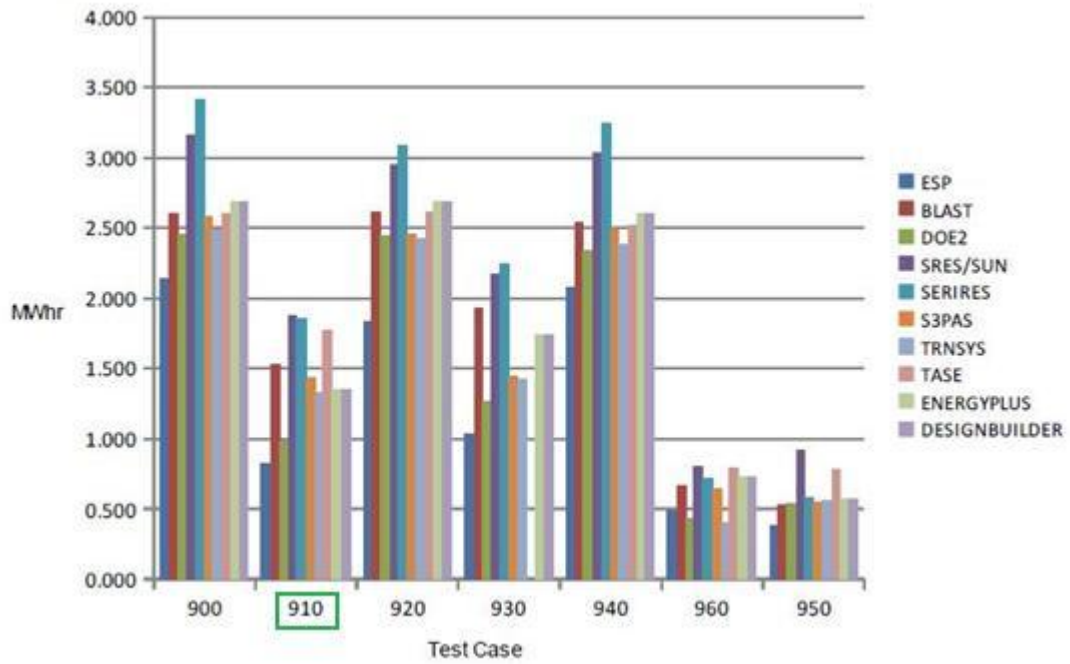


Gráfico 4.2 – Necessidades energéticas de arrefecimento para os casos a que se remete – [Fonte: ANSI/ASHRAE Standard 140-2007 *Building Thermal Envelope and Fabric Load Tests – DesignBuilder Version 3.0*].

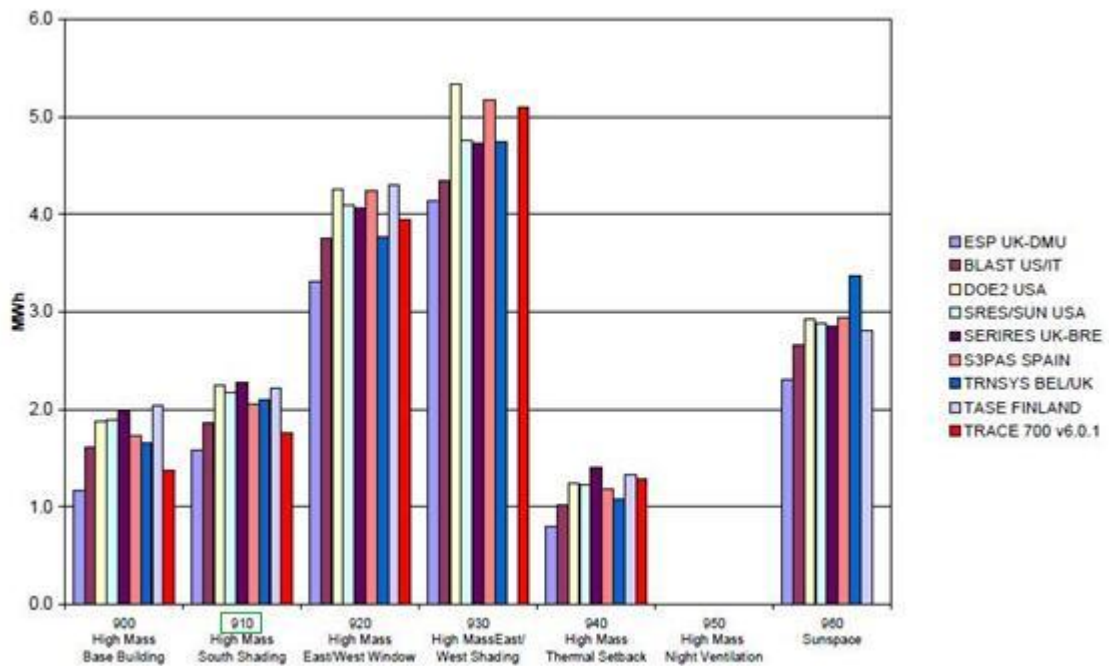


Gráfico 4.3 – Necessidades energéticas de aquecimento para os casos a que se remete – [Fonte: ANSI/ASHRAE Standard 140-2004 Output Form - Modeling Notes TRACE 700 v6.0].

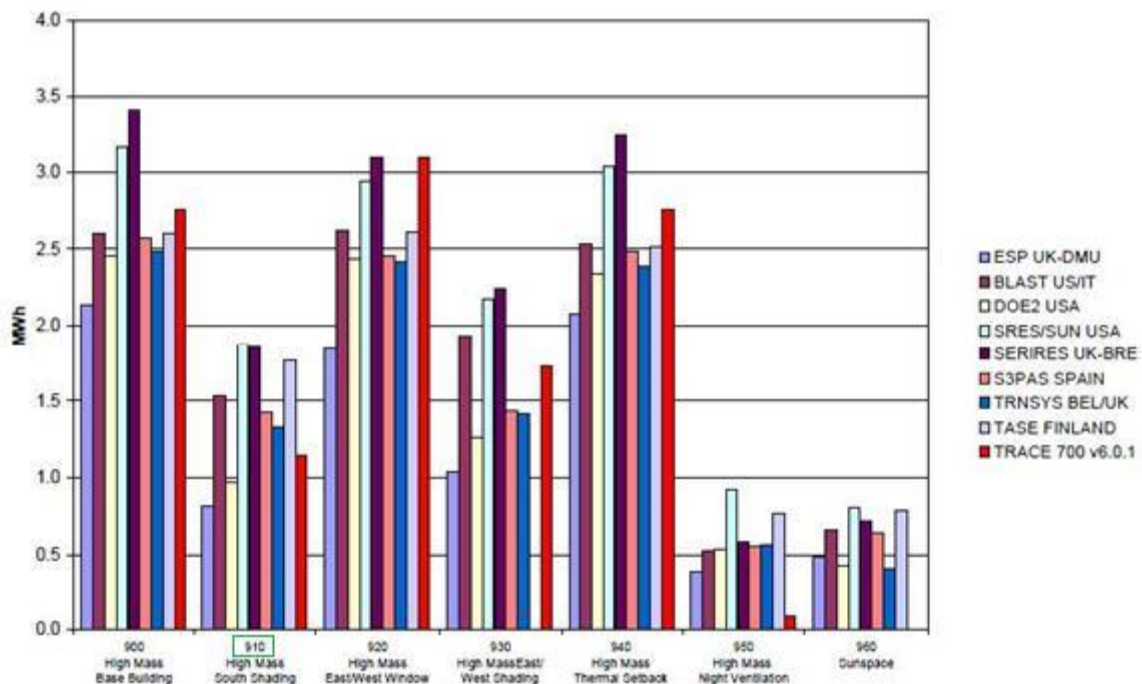


Gráfico 4.4 – Necessidades energéticas de arrefecimento para os casos a que se remete – [Fonte:

ANSI/ASHRAE Standard 140-2004 *Building Thermal Envelope and Fabric Load Tests – Trace 700 Version 6.0*].

Conforme se constata, o desvio estimado para as necessidades de aquecimento entre o *Design Builder* e o Trace 700 é aproximadamente igual a **19%**, valor este superior ao ocorrido no caso em estudo. Em relação às necessidades de arrefecimento o desvio máximo espectável pela norma ronda o valor de **15.5%**, o que permite concluir que ambas as simulações por recurso a 2 *softwares* diferentes apresentam um comportamento relativo face aos resultados dentro do que será espectável.

Deve-se referir-se ainda que existem alguns pressupostos de cálculo interno de cada programa que poderão incorrer num aumento ainda maior dos desvios apresentados, como por exemplo, a **metodologia do cálculo da carga térmica**, os valores gerados para o coeficiente de convecção exterior e interior quando o utilizador pretende não utilizar um valor fixo, a própria conversão dos ficheiros climáticos para os respectivos formatos de cada *software*, EPW e IWC, que pode influenciar alguns parâmetros climáticos, tais como, a variação da radiação solar directa e difusa ao longo do ano, na velocidade média mensal do vento, nas temperaturas exteriores do ar e amplitudes térmicas.

Em relação aos desvios nos consumos eléctricos dos ventiladores e electrobombas circuladoras, o desvio ocorrido entre os dois *softwares*, poderá advir do facto da diferente “livraria” de equipamentos disponível nos 2 *softwares*, sendo que o Trace 700 apresenta mais opções face ao DB e este último não possui uma livraria de equipamentos, mas sim a curva característica dos equipamentos, pelo que, poderá originar maiores desvios nos consumos finais dos mesmos.

Não sendo o âmbito da presente tese, a comparação dos impactos, que poderão advir dos pressupostos que cada *software* de simulação utiliza ou poderá utilizar, com as opções do

utilizador, achei interessante analisar uma das variáveis descritas no parágrafo anterior, com o objectivo de analisar o impacto que poderá existir, nos valores finais das simulações energéticas.

O Trace 700, por exemplo, permite ao utilizador, que este escolha o método de cálculo das cargas térmicas, o que origina resultados diferentes para o mesmo caso em estudo. A simulação efectuada no Trace, utilizou o método UATD e o RTS, para o aquecimento e arrefecimento respectivamente, enquanto que no *DesignBuilder*, a metodologia utilizada foi a CTF, no entanto ao utilizar outra metodologia para o cálculo das cargas térmicas de arrefecimento, assiste-se a desvios face ao *DesignBuilder* superiores aos que ocorreram ao utilizado no presente caso. O gráfico 1.9 ilustra os respectivos desvios utilizando metodologias de cálculo diferentes no Trace 700.

Convém referir que, em relação às diferentes metodologias de cálculo das cargas térmicas de aquecimento, não é apresentado nenhum estudo, visto que estas pouco influenciaram no resultado final desta parcela.

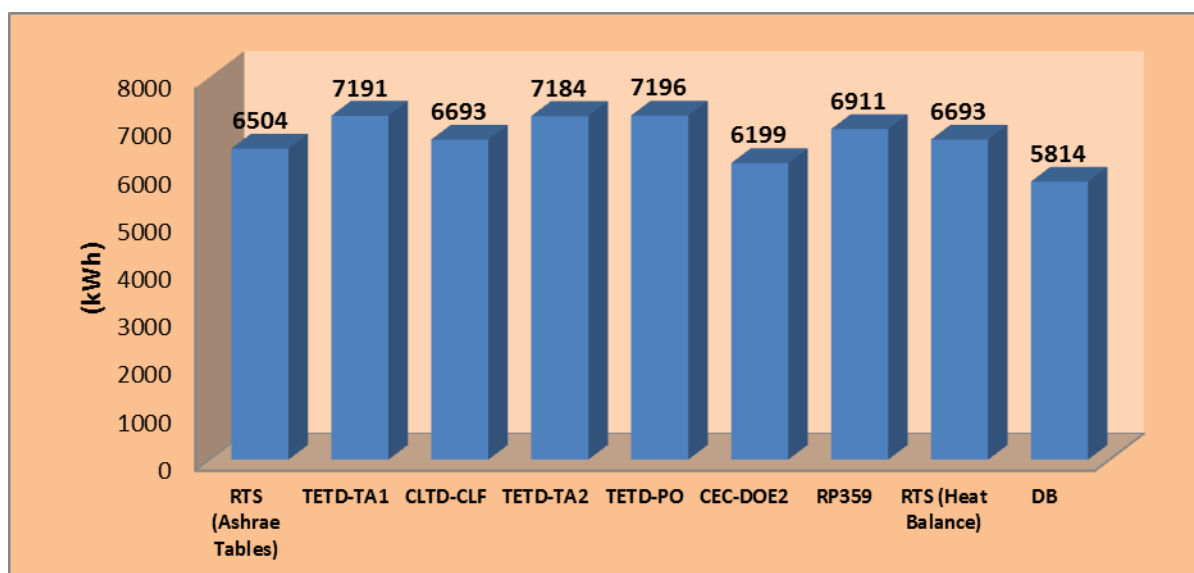


Gráfico 5 – Consumo eléctrico anual para diferentes metodologias de cálculo das C.T de arrefecimento.

A metodologia de cálculo das cargas térmicas de arrefecimento, que poderá ser seleccionada pelo utilizador, **influencia o resultado da parcela do consumo eléctrico anual**, porque assiste-se a uma série de resultados possíveis que podem oscilar num intervalo de valores que diferem **até 19.2%** em relação aos resultados obtidos com o *DesignBuilder*. Uma conclusão que se pode retirar, da análise aos resultados do gráfico 5.0, é que para a **certificação energética** de um edifício ou fracção autónoma, **diferentes metodologias de cálculo das C.T** podem influenciar com que **o edifício cumpra ou não as metas impostas pelo RSECE** e ainda influenciar na sua **classificação energética**.

8. Optimização energética da envolvente

8.1. Envolvente opaca

8.1.1. Parede Exterior

Na envolvente opaca, o primeiro elemento estudado foi a parede exterior. Foi analisado o sistema base, sendo que a constituição da parede exterior está reportada nos anexos da tese, no entanto esta parede contém o isolamento térmico pelo exterior, uma técnica vulgarmente conhecida por **ETICS** ou *Capotto*.

Uma das vantagens, é a redução das pontes térmicas, o que se traduz por uma espessura de isolamento térmico mais reduzido, para a obtenção de um mesmo coeficiente de transmissão térmica global da envolvente.

Para quantificar e perceber o comportamento térmico-energético do edifício face a paredes exteriores com outra constituição, foram analisados 4 tipos de parede diferentes, a primeira a do caso base que está descrita anteriormente, a segunda com um coeficiente de transmissão térmica igual a 50% do U_{ref} definido pelo RCCTE para a região I₃, sendo que para garantir o $U_{ref50\%}$ foi necessário aumentar a espessura do isolamento térmico em cerca de 5 cm face ao sistema base e continuando com a solução de *Capotto*. A terceira parede visou garantir um coeficiente de transmissão térmica igual a 25% do U_{ref} , o que originou um aumento da espessura de isolamento térmico de 20 cm face ao case base, adoptando novamente a solução de *Capotto*. A título meramente informativo é apresentado ainda o consumo energético associado a uma envolvente que apenas cumpra o valor mínimo exigido regularmente.

Os consumos energéticos parciais para as diferentes paredes estudadas, apresentam-se no gráfico 6, não contemplando a iluminação e equipamento interior, visto que, o consumo eléctrico relativo aos mesmos se mantém constante.

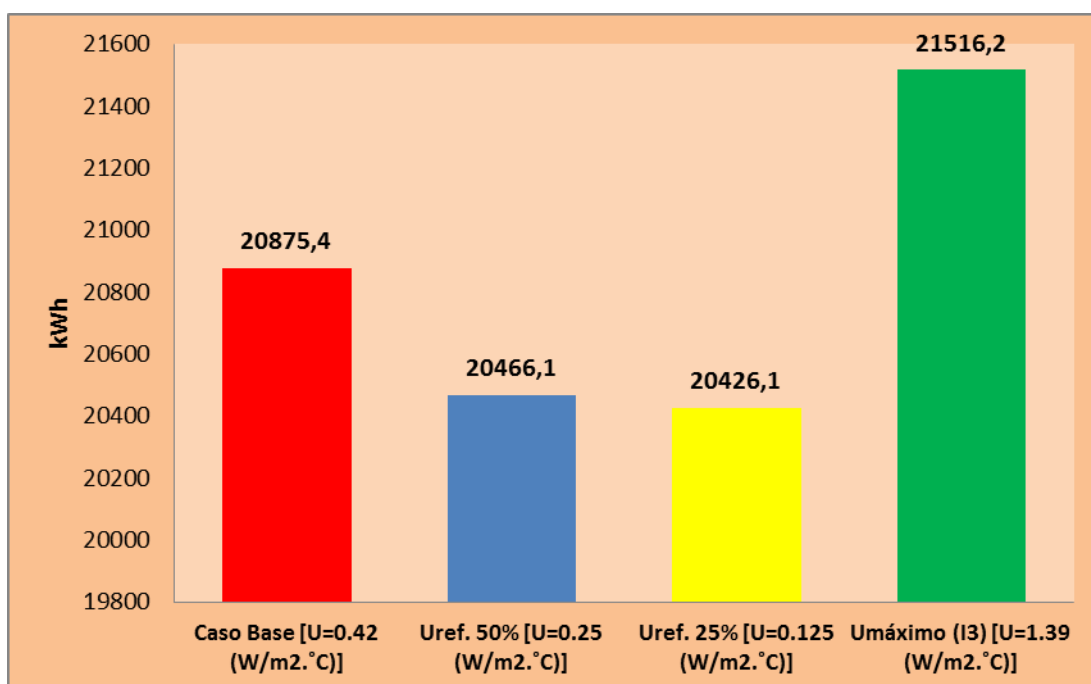


Gráfico 6 – Consumo eléctrico parcial do edifício (sem iluminação e equipamentos interiores) para as diferentes paredes exteriores estudadas.

Uma análise ao gráfico anterior permite concluir que o aumento de espessura de isolamento na parede exterior conduz a reduções energéticas em relação à mesma sem isolamento térmico na ordem dos 5%. Se comparar face ao case base, a redução é menor e **cifra-se nos 2,1%**. Neste edifício a contribuição ou a redução energética da parede exterior originada pela diminuição do coeficiente de transmissão térmica não é muito significativa, o que pode ser explicado pela parede exterior com orientação a sul das várias zonas a climatizar ser constituída por 60% de vidro e por ela própria possuir um excelente U, abaixo do valor de referência indicado pelo RCCTE.

Com vista à redução do consumo energético do edifício, teoricamente e analisando o gráfico 6 a parede seleccionada seria a $U_{ref25\%}$ pois é esta que permite uma maior redução nos consumos energéticos, no entanto **a parede seleccionada será a do $U_{ref50\%}$** , visto que é a que possui um *pay-back* simples ou um período de retorno do investimento mais baixo, aproximadamente de 7 anos, razão pela qual, foi considerada a solução óptima e aquela que foi seleccionada. Os pressupostos e o cálculo do *pay-back* simples poderão ser consultados no capítulo 13 – “Viabilidade Económica”.

8.1.2. Cobertura

Neste subcapítulo serão estudados 4 tipos de cobertura diferentes face ao caso base e posteriormente será feita uma análise aos resultados obtidos pela simulação dinâmica. A exemplo do que foi realizado para as paredes, para quantificar e perceber o comportamento térmico-energético do edifício face a outro tipo de coberturas com constituição diferente face ao caso base.

A primeira cobertura reporta-se a um coeficiente de transmissão térmica igual ao U_{ref} definido pelo RCCTE, o que levou a um aumento da espessura de isolamento térmico de cerca de 4 cm, isto é, duplicou-se a camada de isolamento térmico face ao caso base. A segunda cobertura estudada permitiu reduzir ainda mais o U face ao U_{ref} definido pelo RCCTE e ser um valor intermédio entre a primeira e a terceira cobertura estudada, sendo esta última dotada de um U igual ao $U_{ref25\%}$. Para tal, na segunda cobertura aumentou-se o isolamento térmico face à primeira cobertura (U_{ref}) em cerca de 10 cm e na terceira cobertura assistiu-se a um aumento de 29 cm, permitindo obter coeficientes de transmissão térmica para as duas coberturas iguais a 0.2 e 0.1 ($W/m^2 \cdot ^\circ C$) respectivamente. A título meramente informativo é apresentado ainda o consumo energético associado a uma envolvente que apenas cumpra o valor mínimo exigido regularmente. Os resultados obtidos relativos ao consumo energético parcial do edifício para os diferentes tipos de cobertura encontram-se reportados no gráfico 7.

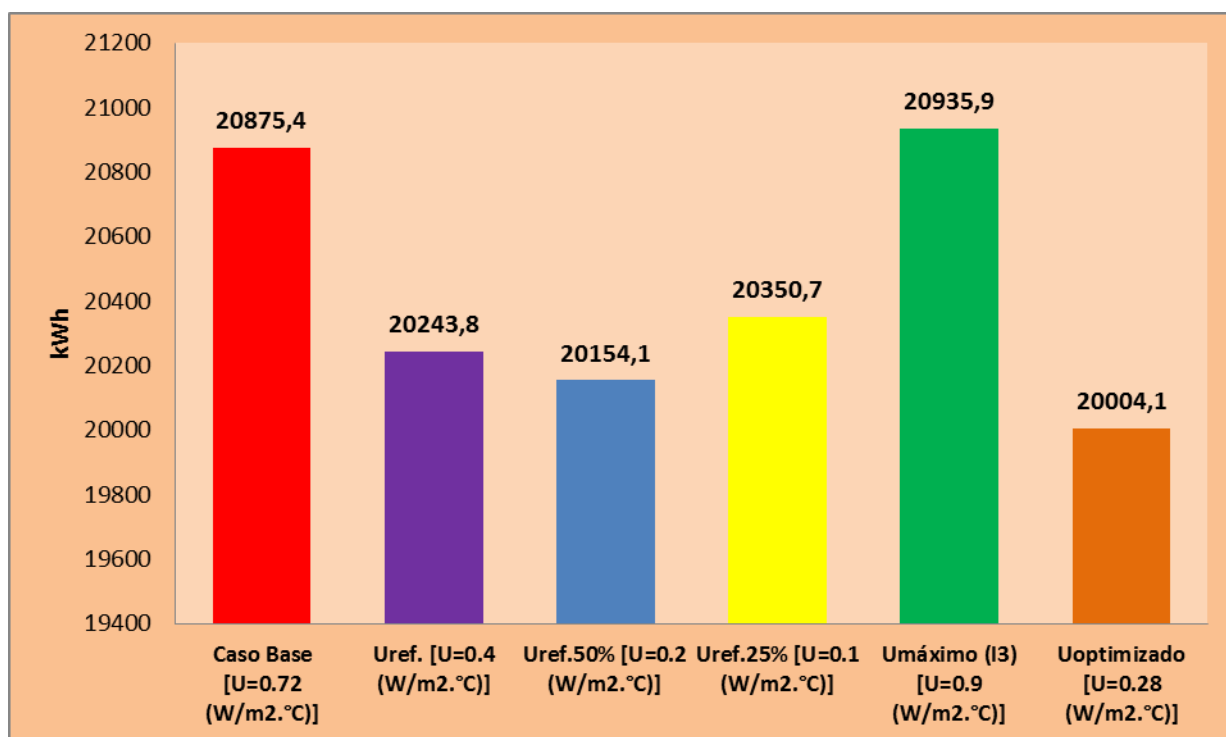


Gráfico 7 – Consumo eléctrico parcial do edifício (sem iluminação e equipamentos interiores) para as diferentes coberturas estudadas.

No seguimento do estudo térmico e energético realizado às diferentes tipologias de coberturas, registou-se que os consumos energéticos, entre o U_{ref} e o $U_{ref50\%}$ eram praticamente iguais, pelo que, **conclui-se que o aumento de isolamento térmico não correspondia a uma**

proporcionalidade directa na diminuição dos consumos energéticos do edifício, razão pela qual, explica o aparecimento de uma nova tipologia de cobertura que induzisse num valor para o coeficiente de transmissão térmica intermédio, entre o de U_{ref} e o $U_{ref50\%}$ e que, neste caso constitui mesmo à solução optimizada (com uma espessura de isolamento térmico igual a 12 cm), conforme pode ser visualizado no gráfico 7 e 7.1, complementarmente o comportamento térmico/energético das diferentes coberturas estudadas.

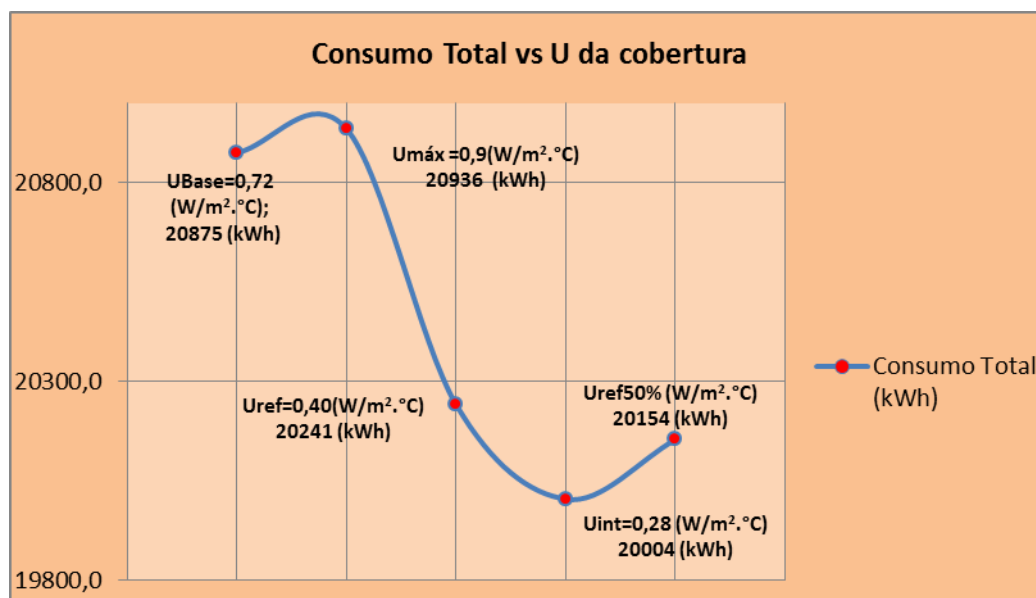


Gráfico 7.1 – Correlação entre o consumo energético parcial do edifício e as diferentes coberturas estudadas.

Comparando os resultados da cobertura com a parede exterior, verifica-se um maior peso percentual **na redução energética** do edifício **no caso da cobertura**, conseguindo-se reduções energéticas face ao caso base de **4,2%, o dobro do valor verificado para a parede exterior**. Existem duas razões, que podem explicar o que atrás foi dito, a primeira passa pelo próprio valor do coeficiente de transmissão térmica de ambos os elementos construtivos no caso base, sendo mesmo o da parede exterior, inferior ao U_{ref} do RCCTE. A segunda razão tem origem na área própria dos dois elementos estudados, sendo a área da cobertura bastante superior à área da parede exterior, contribuindo estes 2 pontos para um papel de maior relevo, quando estuda-se a optimização dos consumos energéticos do edifício.

Com vista à redução do consumo energético do edifício, **a cobertura seleccionada é a que possui o $U_{intermédio}$ e igual a $0.28 \text{ (W/m}^2 \cdot \text{°C)}$.**

8.1.3. Pavimento

Neste subcapítulo serão estudados 3 tipos de pavimentos diferentes face ao caso base e posteriormente será feita uma análise aos resultados obtidos pela simulação dinâmica.

Este elemento do edifício rege-se pelos mesmos pressupostos legislativos do que a cobertura, visto que é a fronteira entre o rés-do-chão e o primeiro piso, sendo que no rés-do-chão todos os

espaços são considerados espaços não úteis e fortemente ventilados, razão pela qual este elemento pertence à envolvente interior mas com requisito de envolvente exterior. Os pavimentos estudados reportam-se a um U igual ao U_{ref} publicado no RCCTE, assistindo-se a um aumento da espessura térmica de cerca de 3,5 cm. Por último, foi estudado um pavimento com um U igual a 50% do U_{ref} , sendo necessário aumentar em cerca de 12 cm a espessura de isolamento térmico face ao caso base. A título meramente informativo é apresentado ainda o consumo energético associado a uma envolvente que apenas cumpra o valor mínimo exigido regularmente. O gráfico 8 apresenta os consumos energéticos parciais do edifício para os diferentes tipos de pavimentos estudados.

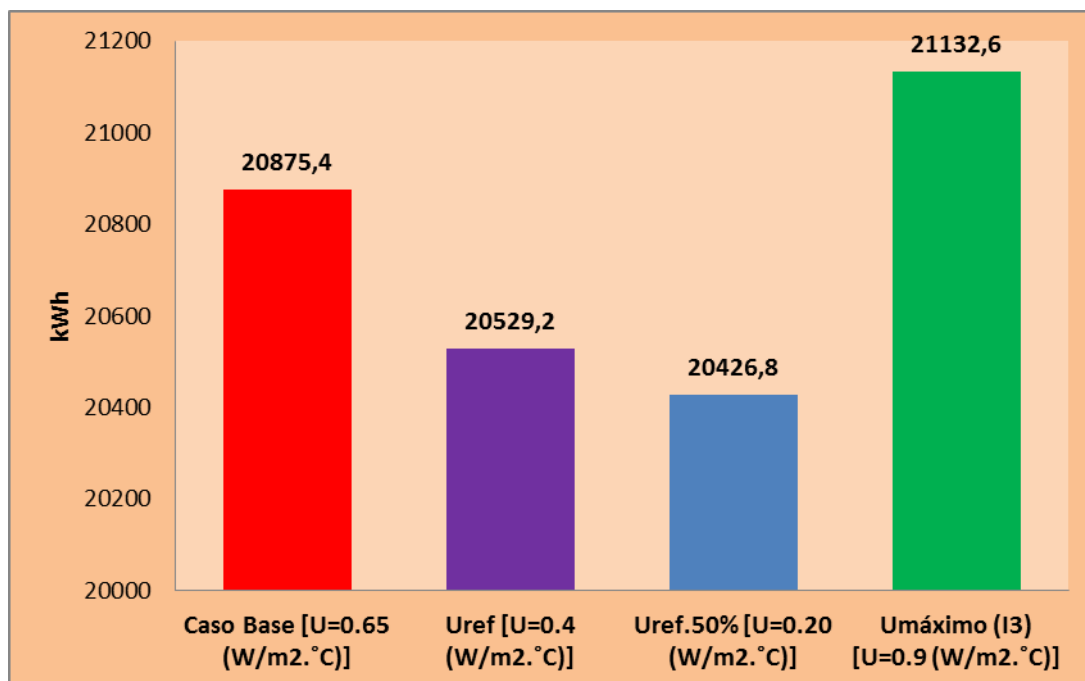


Gráfico 8 – Consumo eléctrico parcial do edifício (sem iluminação e equipamentos interiores) para os diferentes pavimentos estudados.

Resultante do estudo térmico e energético para os diferentes tipos de pavimento, a colocação de uma maior espessura de isolamento térmico, que se assiste desde o caso base até ao $U_{ref50\%}$, induz **em reduções energéticas** que se cifram nos **2.2%**. Teoricamente, o pavimento seleccionado e, analisando exclusivamente o consumo energético, será o que apresenta a redução energética maior, no entanto, analisando numa perspectiva económica, conclui-se que o custo desta alteração, não é justificável pela diferença nos consumos energéticos, **pelo que o pavimento seleccionado é o que possui um U igual ao U_{ref} .**

8.2. Envolvente não opaca – Vãos envidraçados

Neste subcapítulo são estudados diferentes tipos de vãos envidraçados face ao caso base e posteriormente será feita uma análise aos resultados obtidos pela simulação dinâmica.

O estudo deste elemento é dividido em duas etapas, a primeira consistiu em estudar o impacto da componente referente à parte de condução do vidro, e para tal, foi estudado para o mesmo factor solar diferentes coeficientes de transmissão térmica do vidro com referência ao caso base.

De relembrar que neste caso, os vãos envidraçados não possuem dispositivos para protecção solar, tal como cortinas, persianas ou caixas de estores, no entanto a fachada do edifício orientada para sul possui uma pala sombreadora conforme é perceptível na figura 11 e 14, o que interfere principalmente nos ganhos solares na estação de Verão. Os vãos envidraçados estudados vão num intervalo entre um coeficiente de transmissão térmica entre 1.5 até 5.5 ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$) para o mesmo factor solar e igual a 0,45 referente ao caso base, variando desde vidro simples para o primeiro caso, vidro duplo para o caso base e vidro duplo preenchido entre os mesmos com árgon para o terceiro caso.

Deve-se salientar que para este elemento **o RCCTE não limita qualquer valor para o U**, mesmo este estando em contacto directo com o exterior, impondo apenas limites ao seu factor solar directo ou indirecto (combinado com meios de protecção solar activos), estando todos os vãos envidraçados estudados em cumprimento com a legislação vigente. O gráfico 9 ilustra para os diferentes vãos envidraçados estudados e os respectivos consumos energéticos anuais do edifício.

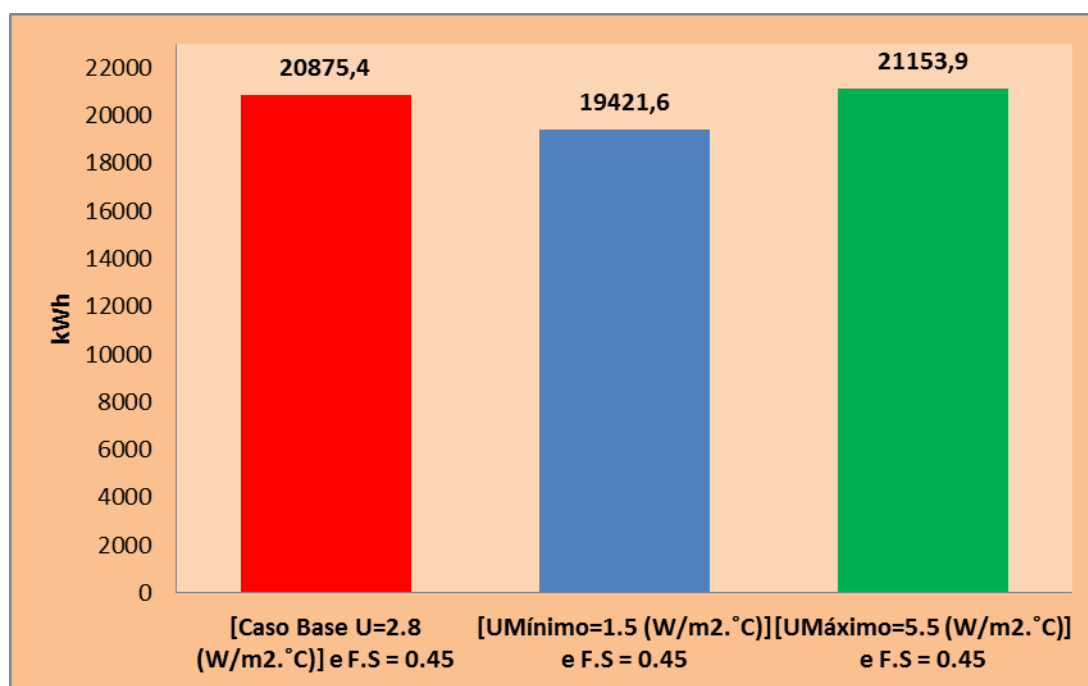


Gráfico 9 – Consumo eléctrico parcial do edifício para diferentes coeficientes de transmissão térmica dos vãos envidraçados.

A diminuição do coeficiente de transmissão térmica do vidro, desde do valor máximo até ao valor mínimo estudado, induz a alterações nos consumos energéticos anuais do edifício. Recorrendo ao gráfico 9, verifica-se que desde o caso mais desfavorável até ao caso de eleição, onde o coeficiente de transmissão térmica do vidro é igual a 1.5 ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$), existe uma **redução no consumo parcial do edifício de cerca 8.2%** e, efectuando uma comparação directa com os resultados obtidos para a envolvente opaca estudada anteriormente, esta parcela é sensivelmente igual à soma de todas as restantes razão pela qual, na minha opinião deveria existir

limites regulamentares não só para o factor solar do vidro, mas também no seu coeficiente de transmissão térmica, porque como demonstrado anteriormente assiste-se a uma variação considerável nos consumos energéticos estando os 3 vidros em cumprimento com a legislação vigente.

A segunda etapa do estudo consistiu, em analisar diferentes vidros com factores solares distintos e verificar o seu impacto no consumo energético do edifício. Os diferentes factores solares estudados foram 3, correspondendo o primeiro, ao factor solar máximo admissível pelo RCCTE para a região V₂ para uma classe de inércia térmica forte, o segundo factor solar teve em consideração o valor de referência do RCCTE e o terceiro factor solar do vidro estudado foi o de referência diminuído em 40%. Os três factores solares foram estudados, conjuntamente, com coeficientes de transmissão térmica diferentes, com valores compreendidos no intervalo definido no estudo anterior, variando entre vidro duplo com espaçamento de ar, a argón e vidros de baixa emissividade. A escolha do intervalo dos valores, para os diferentes coeficientes de transmissão térmica, teve por base o gráfico 9, servindo este para fazer uma analogia semelhante para o comportamento do vidro definido no caso base, limitando os valores de U's estudados, visto que, no mesmo gráfico verifica-se que no intervalo entre o coeficiente de transmissão térmica igual a 2,8 (W/m².°C) até a 1,5 (W/m².°C) a descida do consumo é praticamente constante.

Os resultados obtidos da simulação dinâmica para os diferentes vidros estudados encontram-se representados no gráfico 9.1.

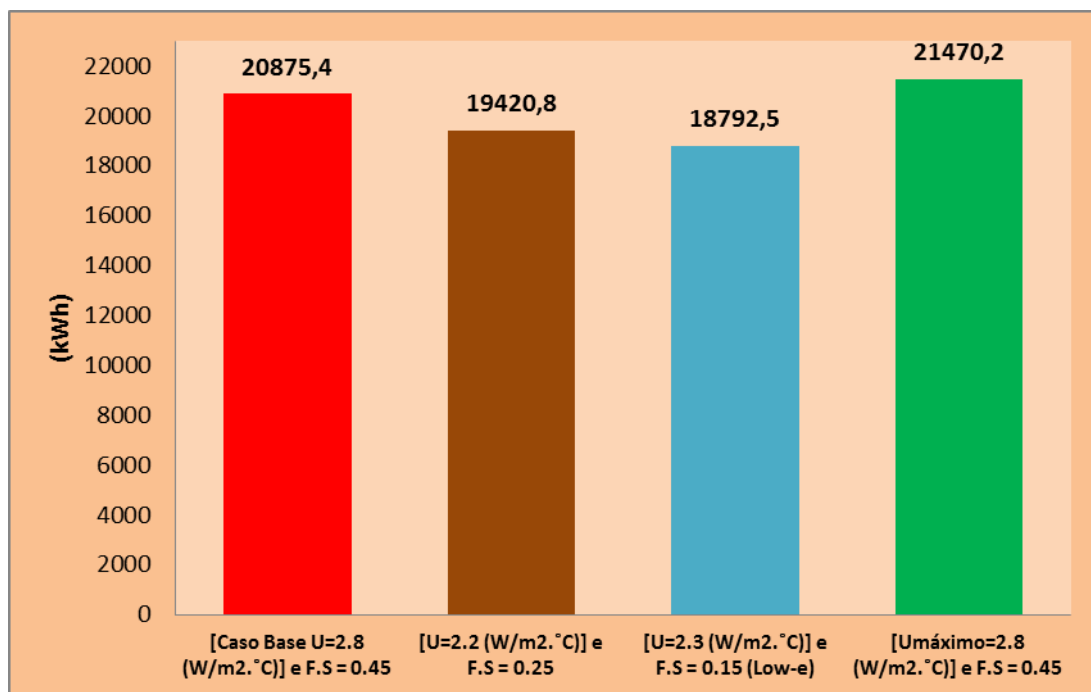


Gráfico 9.1 – Consumo eléctrico parcial do edifício para diferentes tipos de vãos envidraçados, variando o factor solar e o coeficiente de transmissão térmica.

No caso em estudo, **o vidro com o melhor comportamento energético**, é o que possui **menor factor solar**, sendo este de **baixa emissividade**, conforme é apresentado no gráfico 9.1.

A designação emissividade refere-se à capacidade da superfície do vidro para reflectir calor e quanto mais baixa for, **menor é a transferência de calor por radiação**. O vidro de baixa emissividade é especialmente tratado com uma capa transparente, microscopicamente fina e virtualmente invisível, que é aplicada na superfície. A capa reflecte o calor de novo para o edifício, reduzindo, deste modo, a perda de calor através da janela. Também reduz a transferência de calor do vidro interior quente para o vidro exterior mais frio e, por conseguinte, reduz ainda mais a quantidade de calor que se perde através da janela. O gráfico 9.2 pretende apresentar o que foi referido anteriormente.

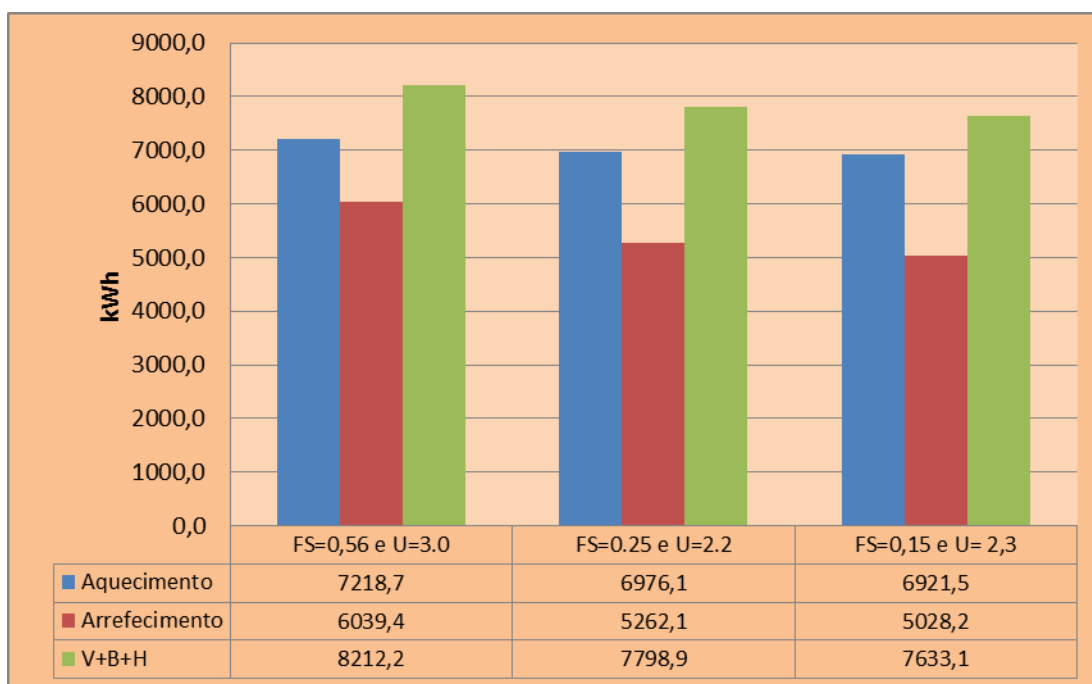


Gráfico 9.2 – Consumo eléctrico parcial do edifício e desagregação do mesmo para diferentes tipos de vãos envidraçados, variando o factor solar e o coeficiente de transmissão térmica.

Tendo a capa propriedades que permitem reflectir o calor novamente para dentro do espaço aquecido, a mesma permite que grandes quantidades de energia solar entrem no edifício, aquecendo-o deste modo. **No arrefecimento** apresenta um bom desempenho, na medida que possui um factor solar muito baixo e um U também baixo, não permitindo que exista tantas trocas de calor do meio exterior mais quente para o meio exterior climatizado e com uma temperatura do ar mais baixa. A inclusão do gráfico 9.2 pretende ilustrar o que foi referido atrás, principalmente na estação de aquecimento, em que, com valores semelhantes de coeficientes de transmissão térmica e com factores solares distintos, um que é o máximo admissível pelo RCCTE, contrapondo com outro muito mais baixo, é verificado que este último não compromete na estação de aquecimento. No que concerne às necessidades energéticas de arrefecimento do edifício, as mesmas reduzem-se com a inclusão de vidros com baixa emissividade em cerca de 17% face a um vidro com o factor solar máximo admissível.

Fazendo uma análise aos resultados obtidos, verifica-se que os consumos energéticos do edifício, e de acordo com o gráfico 9.1, **desde o melhor caso até ao mais desfavorável diferem 13%**, sendo que **para o caso base**, esta diferença seja menor, conseguindo-se uma redução no

consumo energético do edifício em cerca de **10%**, o que reforça a importância de uma adequada selecção dos envidraçados. O vidro seleccionado é de baixa emissividade e possui um U igual a 2.3 e um factor solar de 0.15.

8.3. Conjugação das melhorias: envolvente opaca e não opaca

Este subcapítulo tem como objectivo fundamental quantificar as reduções energéticas, em função das melhorias à envolvente, seleccionadas como óptimas e na sua aplicação conjunta.

Tabela 22 – Parcela correspondente em % na redução energética por elemento construtivo.

Elemento	Redução energética (%) pela aplicação isolada das medidas propostas	Redução energética (%) pela aplicação conjunta das medidas propostas
Parede exterior [U=0.42 (W/m ² .°C)]	2.1	-
Cobertura [U=0.28 (W/m ² .°C)]	4.2	
Pavimento [U=0.2 (W/m ² .°C)]	2.2	
Vãos envidraçados [U=2.3 (W/m ² .°C)] e F.S=0.15 (Low-e)	10	
Total	18.5	

O conjunto das alterações identificadas como óptimas para cada um dos diferentes elementos da envolvente resulta numa redução energética inferior ao total das reduções obtidas pela aplicação isolada de cada uma daquelas medidas.

A razão para esse facto é simples, ao otimizar-se elemento a elemento estamos sempre a comparar o mesmo ao caso base, que conforme foi mostrado anteriormente, em todos os elementos construtivos tem um comportamento energético inferior, pelo que as reduções energéticas obtidas das melhorias efectuadas a cada elemento da envolvente separadamente são maiores.

9. O efeito da inércia térmica interior

Este subcapítulo tem o objectivo de quantificar e ilustrar o efeito que a inércia térmica interior tem neste caso em estudo. A inércia térmica interior tem um papel preponderante sendo ela própria uma medida que visa aumentar a eficiência energética do edifício, ao permitir a auto-regulação dos ganhos ou perdas térmicas, consoante a estação, e permitir que a flutuação da temperatura interior do edifício não tenha grandes oscilações durante todo o dia, mesmo com os sistemas de climatização desligados.

Para quantificar e analisar o efeito da inércia térmica interior no edifício, foi realizado **um estudo de sensibilidade** alterando o valor da mesma, passando esta de classe forte para fraca. Para tal, houve necessidade de alterar a envolvente opaca, de modo a que esta resultasse numa em que os ganhos/perdas fossem praticamente instantâneos.

Para isso, toda a envolvente foi substituída por chapa de aço com espessura de 1 cm, devidamente isolada, de forma a garantir os mesmos valores dos coeficientes de transmissão térmica de cada elemento utilizados no caso base optimizado do ponto de vista da envolvente. Por outro lado, houve a necessidade de alterar o factor solar do vidro, de modo a manter cumprido o requisito do RCCTE, tendo sido alterado para o valor indicado no mesmo, para uma classe de inércia térmica fraca e para região V₂, sendo neste caso igual a 0.15.

Os resultados obtidos recorrendo à simulação dinâmica encontram-se ilustrados no gráfico 10.

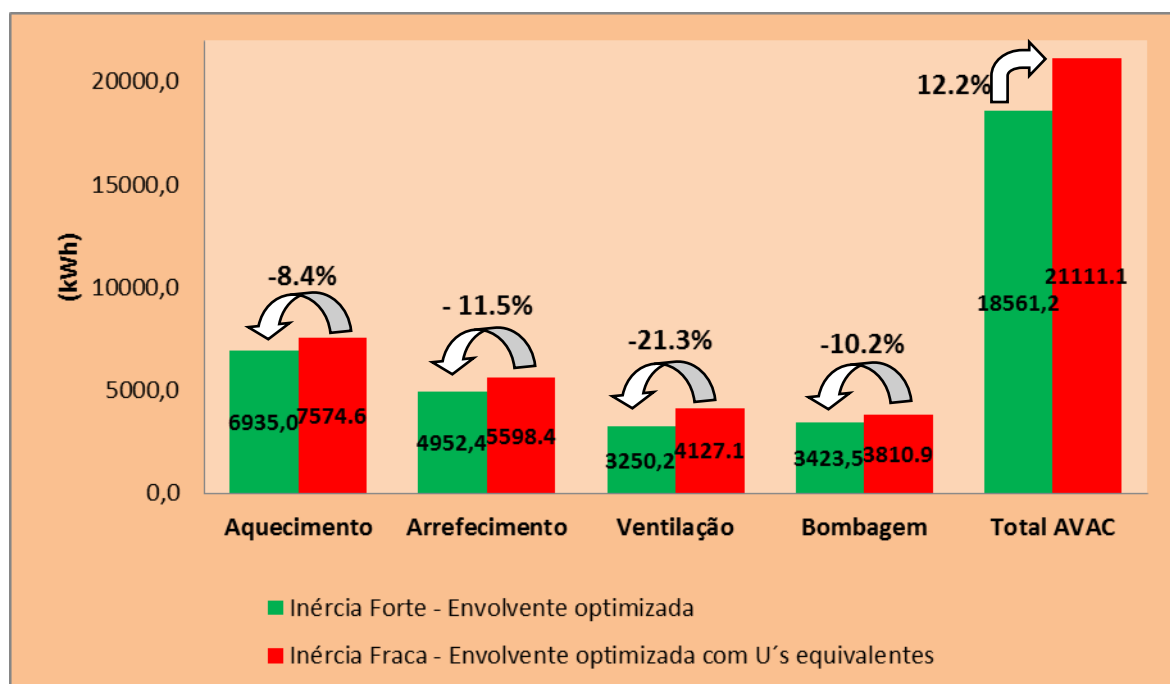


Gráfico 10 – Consumos eléctricos desagregados e parciais (sistema de AVAC) para distintas classes de inércia térmica para o caso base otimizado na envolvente.

Os resultados obtidos para diferentes classes de inércia térmica, afectadas das optimizações à envolvente, são apresentados no gráfico 10, chegando-se à conclusão, que a diferença nos consumos energéticos entre os 2 casos analisados difere **em 12.2%**.

A diferença entre os consumos referentes à parcela da ventilação entre classes de inércia distintas, **constitui a maior variação de consumo energético** entre ambas, traduzindo-se a diferença em **21.2%** a favor da classe de inércia térmica forte.

Com o objectivo principal de estudar potenciais estratégias passivas de climatização (“free-cooling”) para as principais reduções energéticas, inerentes a distintas classes de inércia térmica, optei apenas por colocar na presente tese, um estudo mais extensivo sobre o impacto energético que a inércia tem na parcela energética da ventilação e arrefecimento, constituindo as duas maiores variações nos consumos energéticos, tendo também como objectivo a próxima análise servir de base para uma das medidas apontadas mais frente para a optimização do sistema AVAC optimizado.

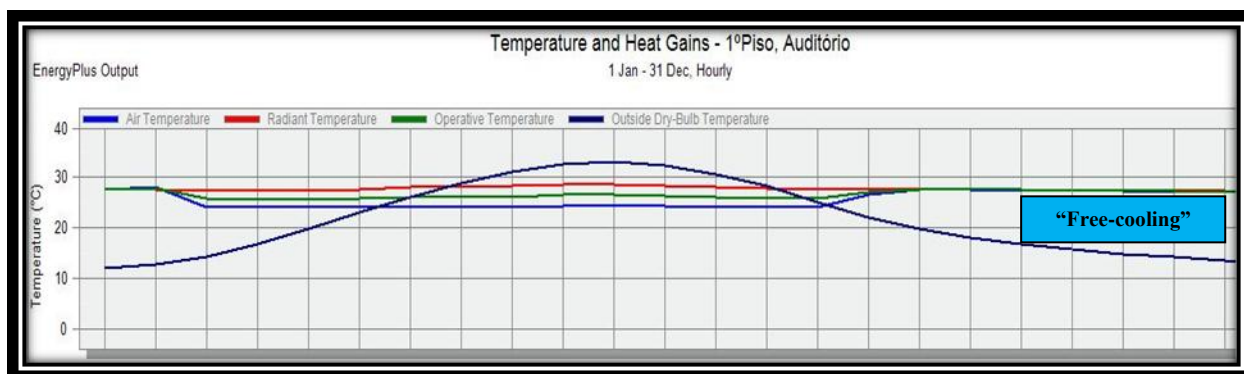


Figura 15 - Distribuição das temperaturas ao longo de um dia típico de Verão – Situação de ocupação (segunda a sexta) com os sistemas de AVAC em operação – Caso base com a envolvente otimizada, com uma classe de I.T forte para o espaço “Auditório” no dia 17 de Julho.

No período imediatamente posterior à ocupação do edifício, correspondendo ao intervalo temporal, compreendido entre as 20h00m até às 6h59m do dia seguinte, em que os sistemas de AVAC estiveram desligados, **a temperatura do ar interior no auditório, manteve-se praticamente constante**, restringida ao intervalo entre os 27 e 28°C, conforme é visível na figura 15, beneficiando em muito **a potência/energia** necessária de **arrefecimento** no arranque do sistema de climatização, e por conseguinte, **no caudal de ar necessário** para retirar as cargas térmicas do espaço.

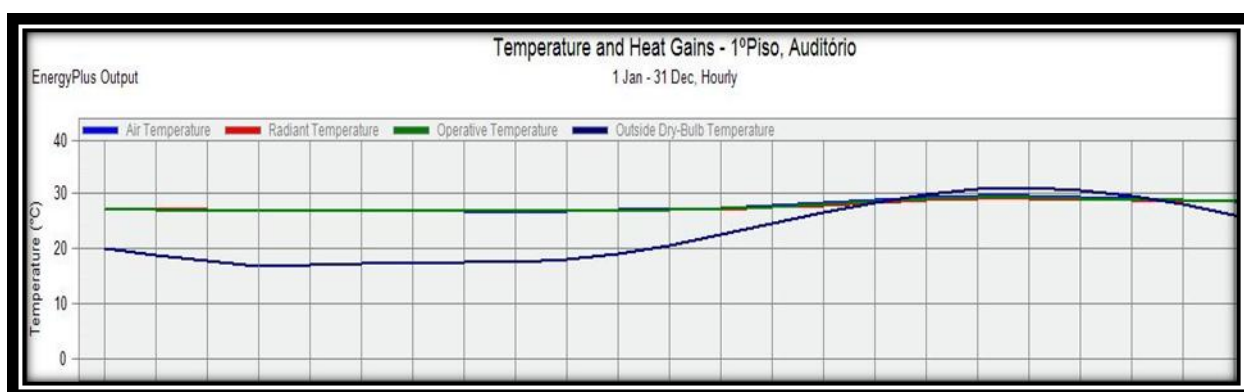


Figura 16 - Distribuição das temperaturas ao longo de um dia típico de Verão – Situação de desocupação (fim-de-semana) com os sistemas de AVAC desligados – Caso base com a envolvente otimizada, para uma classe de I.T forte para o espaço “Auditório” no dia 21 de Julho.

Na situação de desocupação do edifício, isto é, ao fim-de-semana, a figura 16 apresenta o perfil de temperaturas existente, sendo possível constatar que a temperatura interior no espaço sobe ligeiramente face aos dias úteis da semana, mas sempre num patamar **nunca superior a 30°C**. A nível de eficiência energética os dois gráficos ilustram a possibilidade de realização de **“free-cooling”**, sendo que na figura 15 é ilustrado o intervalo de tempo para o dia em questão, em que é possível recorrer ao arrefecimento gratuito. A inclusão das figuras 15 e 16 tem o objectivo de apresentar a pouca oscilação registada nas temperaturas interiores das zonas climatizadas face às temperaturas exteriores, quer no período de funcionamento ou não, do sistema de AVAC,

realçando o papel fulcral que a inércia térmica tem na auto-regulação das temperaturas interiores do edifício.

Para o caso base com a envolvente otimizada e para uma **classe de inércia térmica fraca**, as figuras seguintes ilustram o comportamento térmico e energético do espaço designado como “Auditório”.

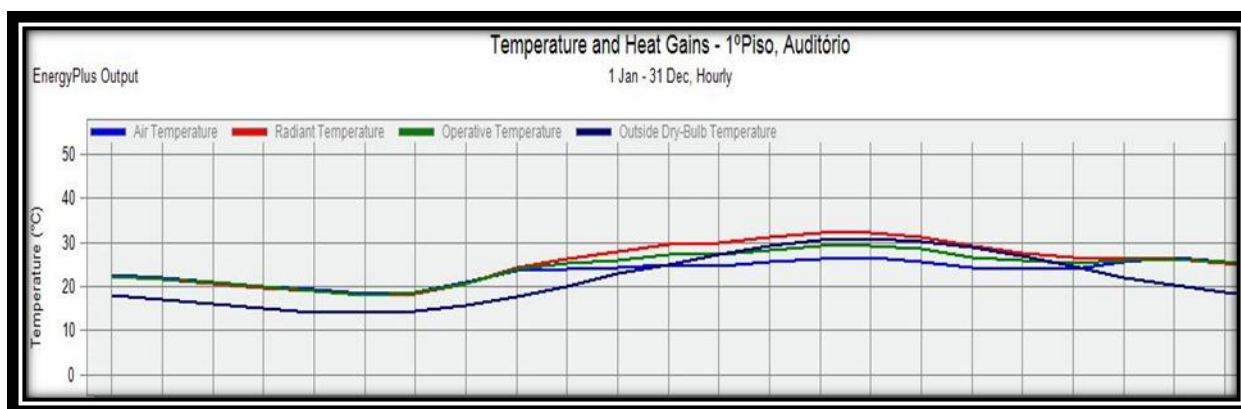


Figura 17 - Distribuição das temperaturas ao longo de um dia típico de Verão – Situação de ocupação (segunda a sexta) com os sistemas de AVAC em operação – Caso base com a envolvente otimizada para uma classe de I.T fraca para o espaço “Auditório” no dia 17 de Julho.

No período de ocupação do edifício, a temperatura interior pretendida é satisfeita, conforme ilustra a figura 17, no entanto, para tal ser possível, existiu um ajuste nas potências de climatização necessárias para o arrefecimento, que comparando com o caso base otimizado, rondaram num incremento de cerca de 23% da capacidade, logo mais energia consumida e conseqüentemente, mais investimento inicial a ser feito na aquisição dos equipamentos do sistema de climatização.

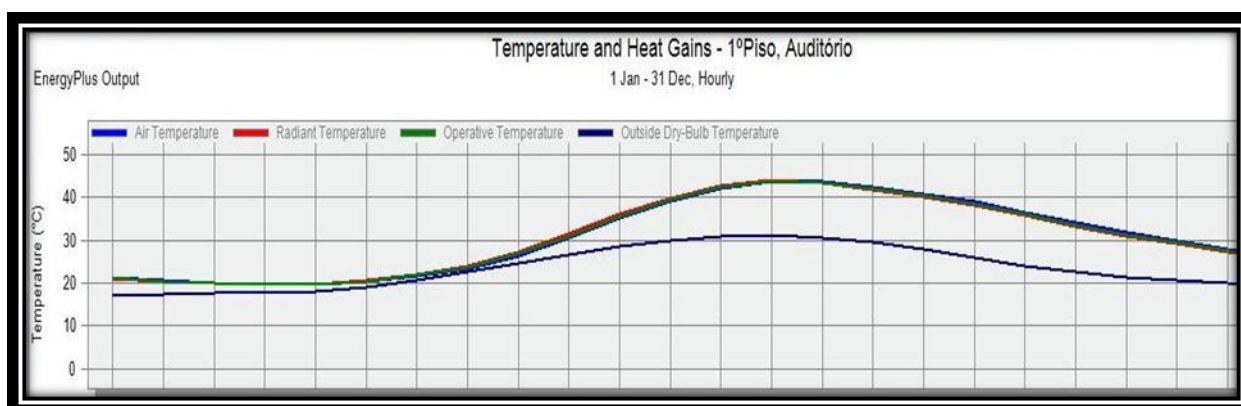


Figura 18 – Distribuição das temperaturas ao longo de um dia típico de Verão – Situação de desocupação (fim-de-semana) com os sistemas de AVAC desligados – Caso base com a envolvente otimizada para uma classe de I.T fraca para o espaço “Auditório” no dia 21 de Julho.

A principal característica num edifício com uma classe de inércia térmica fraca, são as grandes oscilações que ocorrem da temperatura interior em períodos de não ocupação, acompanhando o

perfil e o valor da temperatura exterior ao longo do dia, conforme é visível na figura 18. Esta desvantagem/vantagem é mais sentida nos meses de Verão, prejudicando em demasia os consumos energéticos no que concerne às necessidades de arrefecimento, na ventilação e no conforto térmico do edifício.

Em suma, **neste caso em estudo** pode-se afirmar que **a classe de inércia forte é vantajosa**, na medida em que é possível armazenar a energia recolhida, por períodos mais longos e amenizar, assim, os efeitos das variações climatéricas. A utilização de um nível de inércia forte contribuiu para **armazenar os ganhos solares de inverno e restituí-los ao interior dos espaços**, quando estes forem necessários, aumentando assim o seu factor de utilização. Com uma classe de inércia térmica forte consegue-se prevenir contra os fenómenos de sobreaquecimento característicos das estações intermédias. Estes devem-se a um aumento acentuado da temperatura exterior durante o dia e aos fortes ganhos solares devidos, sobretudo, à incidência de radiação solar directa sobre os envidraçados.

A utilização de materiais na envolvente opaca do edifício, que induzem para uma classe de inércia térmica forte, com isolamento pelo exterior, ofereceu uma protecção eficaz contra os picos diurnos de temperatura verificados no Verão, aumentando ou potenciando assim um leque de vantagens, tais como, o aumento do conforto térmico com menores consumos energéticos do sistema base de climatização, contribuindo para isso fundamentalmente menores necessidades de arrefecimento e ventilação dos espaços.

No entanto, deve-se referir, que a melhor classe de inércia térmica de um edifício depende de vários factores, entre eles a própria geometria do edifício, das necessidades de aquecimento e arrefecimento que serão necessárias, pois existirá situações, em que, poderá ser mais vantajoso utilizar envolventes exteriores que induzam a uma classe de inércia mais fraca ou intermédia.

10. Estudo para a optimização dos Sistemas de Climatização

Neste capítulo são apresentadas medidas que visam aumentar a eficiência energética do sistema de climatização para o caso base optimizado a nível da envolvente. Desde logo, são avançadas algumas medidas ao sistema de climatização base, como se fez a exemplo da envolvente ao propor medidas correctivas até à solução optimizada, caso semelhante será no sistema de climatização base, que dará lugar a um designado **sistema AVAC base optimizado**. O primeiro **dos novos sistemas** de climatização proposto a ser estudado será o **VRV®** com condensação a ar e com recuperação de energia térmica e o segundo será o sistema de AVAC intitulado de **“Green System”**, já anteriormente caracterizados.

Com o auxílio do **Design Builder módulo “HVAC Detailed”** para efectuar a simulação dinâmica dos sistemas de AVAC, os resultados obtidos para os três casos atrás mencionados serão alvo de análises e conclusões. O objectivo deste capítulo é o de analisar e comparar os diferentes sistemas num ponto de vista energético, analogamente ao realizado, em relação à envolvente, e dar a perspectiva ao leitor do que poderá acarretar algumas alterações em certos equipamentos nos consumos eléctricos globais do edifício.

10.1. Sistema AVAC optimizado

10.1.1. Medidas de optimização propostas

Com vista a diminuir ainda mais os consumos eléctricos associado ao sistema de climatização em relação ao caso base com a envolvente optimizada, são propostas algumas alterações ao sistema de AVAC base, a saber:

- **Equipamentos terminais de climatização, piso radiante** na estação de aquecimento e **tecto arrefecido** na estação de arrefecimento para todos os espaços climatizados.

Justificação: **Diminuir/aumentar as temperaturas da água** à saída da bomba de calor, consoante a estação do ano, que por consequência, induzirá a **novas potências** de aquecimento/arrefecimento no equipamento produtor de energia térmica, **mais baixas face ao caso base**. A introdução no sistema optimizado de superfícies radiantes, tem também o **duplo objectivo** de proporcionar o **controlo da temperatura radiante** no próprio elemento onde estão inseridos, e por conseguinte, promover um **abaixamento/subida da temperatura operativa/interior**, diminuindo também o diferencial entre a temperatura interior e exterior do ar e **eliminando consumos energéticos da recirculação do ar**.

O controlo do teor da humidade relativa interior no Verão terá que ser maior, visto que, os tectos arrefecidos não conseguem desumidificar o ar interior, pelo que existiu uma análise cuidada a cada espaço, de forma a verificar as necessidades reais de desumidificação em cada um, com o intuito de averiguar, se seria necessário, que todos os espaços fossem servidos por uma **bateria de arrefecimento adicional**, capaz de manter os mesmos com o teor de humidade preconizado no caso base, originando humidades relativas interiores compreendidas no intervalo de **45% a 55%**.

- **Introdução do ar novo por uma central única de tratamento de ar de volume de ar variável.**

Justificação: **Centralizando** o que antes existia em vários equipamentos num só, tem o objectivo principal de **reduzir os consumos energéticos**. A opção de a UTA ser VAV, tem o intuito de adaptar o sistema de AVAC optimizado às necessidades reais da zona a climatizar. A opção de centralizar é possível, devido aos espaços poderem ser englobados numa única zona, pois todos têm praticamente o mesmo comportamento durante todo o ano. No entanto, o Auditório terá uma análise mais cuidada, devido à sua alta taxa de ocupação.

- **A unidade de tratamento de ar será dotada de recuperação de calor, com possibilidade de “free-cooling” e de “economizer”.**

Justificação: Estudar a hipótese de climatizar **fora do período de ocupação**, especialmente em horas nocturnas no Verão, tem o intuito de aproveitar o diferencial existente entre o ar exterior e o interior efectuando **“free-cooling”**, com o objectivo de **baixar os consumos eléctricos** no “arranque” do **chiller**, promovendo também o **controlo da temperatura nos períodos de não ocupação**.

- **Aumento da eficiência de ventilação para o máximo de 1.**

Justificação: **Diminuição do caudal de ar novo** a ser movimentado pela unidade de tratamento de ar, promovendo a diminuição da potência dos ventiladores, e por conseguinte, numa redução dos consumos energéticos da UTA.

- **Aumento da eficiência de todos os motores eléctricos** associados a todos os **propulsores de fluidos** e de **velocidade variável** (Bombagem e Ventilação).

Justificação: Com esta medida pretende-se dotar a instalação com um alto desempenho energético, **eliminando desperdícios de energia**.

- **Controlo da iluminação interior**, ajustando o nível de iluminação à taxa de ocupação real do espaço, ao invés do controlo praticado *ON/OFF* (**considerações finais**).

Justificação: Relembrando os resultados obtidos da simulação dinâmica efectuada com o *Design Builder*, **47% do consumo eléctrico do edifício** é referente à **iluminação interior**, pelo que, não fazendo parte do âmbito da mesma analisar esta questão, não poderia deixar, que a mesma passasse despercebida e sem uma análise, de forma a quantificar possíveis reduções energéticas que podem advir de a mesma, aliada a um controlo e comando eficaz, e a interagir directamente com a iluminação natural, podem trazer **na optimização dos consumos energéticos do edifício**.

De forma a perceber as diferenças entre os equipamentos terminais de tratamento do ar utilizados no caso base e no optimizado, fez-se uma comparação, entre difundir o ar por convecção forçada (caso base), como método principal de transferência de calor e a difusão do ar, com um misto entre a convecção forçada e radiação, promovendo a convecção natural, de que o piso radiante faz uso (sistema optimizado). A comparação atrás referida, pode ser consultada no capítulo dos Anexos da tese, no subcapítulo “CFD”.

10.1.2. Resultados obtidos

Após a introdução de todas as medidas propostas e optimização do controlo inerente ao sistema proposto, **a redução energética obtida é igual a 28.1%**, em relação **ao caso base com a envolvente optimizada** e conforme é apresentado no gráfico 11.

Esta redução energética é ainda maior se compararmos com o caso base, obtendo-se uma **redução energética igual a 36%**.

Com o objectivo **de reduzir ainda mais os consumos energéticos do sistema de climatização**, na nova simulação dinâmica, esta incorpora uma melhoria na eficiência de todos os motores eléctricos acoplados aos equipamentos propulsores de fluidos na unidade de ventilação, que dependente da potência e da classificação energética do mesmo, poderá variar a % de aumento de eficiência. Na generalidade, esse valor correspondeu sensivelmente **a 5%**. A não inclusão desta medida nos restantes propulsores de fluidos, que neste caso são as electrobombas, é devido à sua **alta eficiência já de raiz**, correspondendo a motores com elevada eficiência e conotados com a designação **IE3 – “Premium Efficiency”**.

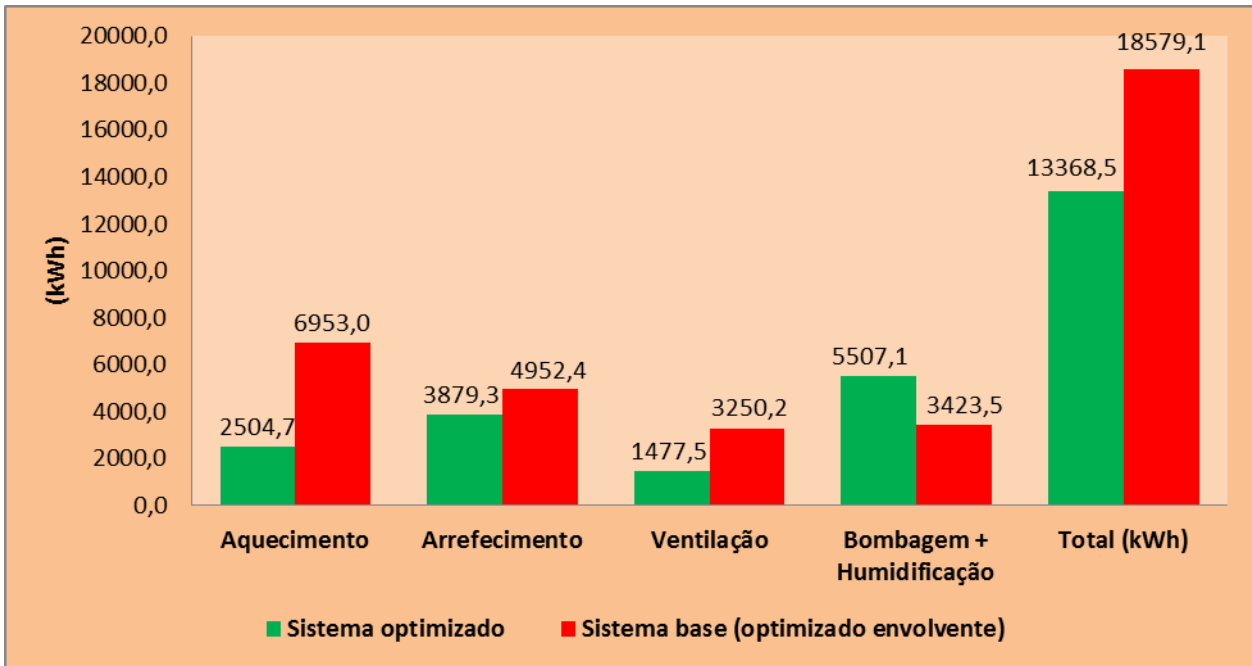


Gráfico 11 – Comparação e desagregamento dos consumos eléctricos parciais do sistema optimizado e o sistema base (optimizado envolvente).

Os resultados obtidos para o consumo energético do sistema AVAC, incluem também a opção de “Economizer” na UTA, isto é, os ventiladores podem fornecer em certos períodos de tempo, até 100% do ar novo quando as condições são favoráveis (temperatura exterior menor do que a interior), mas no intervalo de tempo de funcionamento do edifício e com o *chiller*/bateria continuando em operação parcial consoante as necessidades. Fora do período de ocupação do edifício, que neste caso é a partir das 20h00m até as 6h59m à semana, e as 48h do fim-de-semana, **não se apresenta os resultados dos consumos energéticos com a inclusão do arrefecimento gratuito**. As razões pelas quais não se optou por esta solução, serão justificadas no capítulo 10.1.4.

10.1.3. Análise aos resultados obtidos

O consumo global energético do sistema optimizado é menor face ao caso base com a envolvente optimizada, correspondendo a uma **redução energética de 28%**, sendo que a maior redução registada ao visualizarmos os consumos de AVAC desagregados, é referente ao consumo energético registado nas parcelas de **aquecimento e na ventilação**.

Em relação ao aquecimento, a descida é bastante significativa, correspondendo a uma poupança **energética de 64%**, contribuindo para isso dois factores, o primeiro tem como base a descida na temperatura da água quente produzida pela bomba de calor, que no caso base cifrava-se nos **45°C** e no caso optimizado reduziu-se para os **30°C**, em virtude da inclusão do piso radiante. O segundo factor está relacionado com a **recuperação de calor na UTA**, que neste caso, foi simulado para uma recuperação do calor sensível, que garantisse o ar à saída do recuperador e misturado com o ar novo nos **15°C**, **sem comprometer os caudais mínimos de ar novo impostos pelo RSECE**,

baixando significativamente o diferencial térmico entre o ar novo a ser tratado directamente numa bateria de aquecimento, como acontecia com o caso base.

O consumo relativo à **ventilação** também sofreu uma redução significativa, **atingindo-se um diferencial face ao caso base em cerca de 51.3%**. A razão para tal diferença é simples, e assenta em três factos, o primeiro foi a centralização de equipamentos numa UTA, reduzindo-se os consumos energéticos, devido ao facto do tratamento efectuado ao ar nos diferentes espaços ser realizado de igual modo, assimilando-os numa única zona, aumentando assim o seu nível de eficiência energética, pois temos menos equipamentos consumidores de energia eléctrica referentes à ventilação.

Outro factor preponderante, foi a própria concepção do novo sistema implementado, isto é, não sendo as UTA's a tratarem termicamente o ar interior nos diferentes espaços, como acontecia no caso base, os caudais de ar a movimentar pelos ventiladores da mesma, ficam reduzidos aos caudais de ar novo mínimos impostos pelo RSECE, ao contrário do caso base, em que aos caudais de ar mínimos, tinha-se que aumentar para ser possível a introdução/retirada de calor consoante a estação. **A introdução do piso radiante aliada à recuperação de calor nas UTA's foi decisiva** para atingir os valores apresentados no gráfico 11.

O aumento da eficiência nos motores eléctricos acoplados aos ventiladores, traduziu-se numa redução energética de **11.3%**, no consumo anual dos ventiladores.

Ao visualizarmos os consumos desagregados do sistema optimizado, ressalta que, **os consumos referentes à bombagem e humificação do sistema**, pois esta componente é a única que regista uma **subida** no consumo energético em cerca de **60% face ao caso base**. Ao desagregamos esta parcela verifica-se que o consumo das electrobombas mantém-se praticamente igual ao caso base, no entanto, a grande diferença para o optimizado é o consumo referente **à humificação do ar interior**, que **umenta** praticamente para o **dobro**, pelo que a resposta para este aumento energético relativamente à humificação tem por base dois factores.

O primeiro é o próprio controlo/parametrização efectuada no sistema, visto que, no sistema base foi definido um intervalo satisfatório, entre os 45% a 55% de humidade relativa no interior dos espaços, enquanto no sistema optimizado, fixou-se o mesmo parâmetro para os **50%** e efectuou-se um controlo mais fino para esta variável, aumentando assim as necessidades de humificação no ar introduzido para cada espaço.

No entanto, o factor com **mais preponderância no aumento da parcela de humificação do ar**, foi que, no sistema optimizado ao invés do que acontecia no caso base, todos os espaços são tratados de igual modo, sendo possível fazer um controlo mais “apertado” da humidade relativa interior, enquanto no sistema base, existiam espaços onde esse controlo não era realizado, especialmente nos três gabinetes existentes, onde o ar interior era tratado termicamente por “*fan-coils*”, não permitindo o controlo da humidade relativa interior na estação de aquecimento, **mas sim e apenas só, o controlo da temperatura no interior dos espaços.**

Analisando agora a componente referente ao arrefecimento verifica-se que esta é a que registou a menor descida energética face ao caso base, pelo que se terá colocar a seguinte questão:

“porque o consumo energético referente à parcela do aquecimento baixa 63% e a do arrefecimento apenas baixa 21,7%”?

A resposta para essa pergunta surge ao analisarmos o funcionamento do sistema de AVAC em si.

A diferença nas temperaturas da água à saída da bomba de calor, entre a situação de aquecimento/arrefecimento, constata-se que a diferença térmica maior é verificada no aquecimento ao atingirmos um **diferencial de 15°C** face ao caso base melhorado (passou de 45°C para 30°C) enquanto no arrefecimento subiu-se a temperatura da água à saída do grupo produtor de energia térmica, atingindo-se um **diferencial de 9°C** face ao caso base melhorado (7°C para 16°C) pelo que já era expectável que a descida na parcela do aquecimento fosse maior do que no arrefecimento.

No entanto, o factor decisivo foi a inclusão do recuperador de calor na UTA conjugado com o piso radiante, diminuindo o diferencial térmico existente entre o interior e o “exterior”, colocando o ar à saída do mesmo nos 15°C, obtendo-se apenas um diferencial térmico de 5°C que será compensado neste caso pelo piso radiante, sem realizar, mesmo assim, qualquer recuperação do calor latente proveniente dos espaços climatizados. A **não adopção** de uma **roda entalpática** para recuperação do calor latente, teve por base os caudais de ar movimentados pela UTA, sendo ainda diminutos para incorporar uma roda entalpática, o que iria penalizar substancialmente este sistema na sua viabilidade económica.

10.1.4. Considerações à obtenção dos resultados

O controlo desta instalação de climatização é fundamental, para que os parâmetros que definem o conforto térmico estejam **dentro do intervalo pretendido**, a humidade relativa e temperatura do ar interior.

Analisar os principais parâmetros deste sistema de climatização, verificando as suas condições de funcionamento, ajustar a sua parametrização, ou até no limiar na introdução de novos equipamentos que complementem o mesmo são de extrema importância, na medida em que os resultados obtidos através da simulação dinâmica sem esta análise, **poderão ser erróneos**.

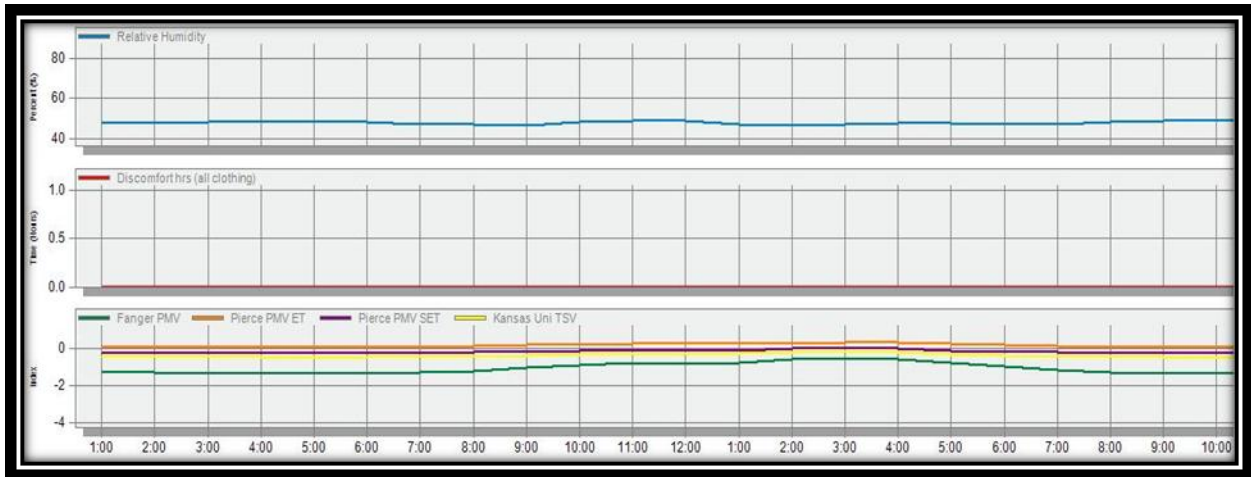


Figura 19 - Resultados obtidos da simulação dinâmica para a humidade relativa interior, número de horas de desconforto e diferentes índices de conforto para o espaço designado como “Auditório” num dia típico de Inverno (3 de Janeiro).

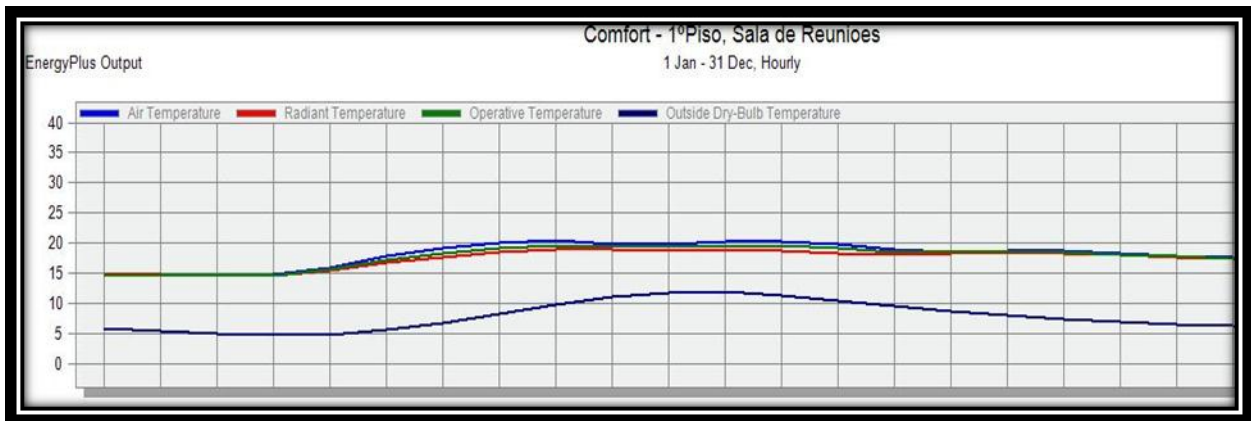


Figura 20 - Resultados obtidos da simulação dinâmica para a temperatura interior, operativa e radiante para o espaço designado como “Sala de reuniões” num dia típico de Inverno (3 de Janeiro).

O objectivo de analisar o espaço em causa e fazer uma breve análise ao conforto térmico, na situação de aquecimento, conforme mostram as figuras 19 e 20, não é de explicar o mesmo, no entanto, foi aproveitada esta funcionalidade disponível no DB, que permite retirar algumas informações importantes, que permitem auxiliar na averiguação do desempenho real do sistema de climatização. Para tal, análise/verificação dos valores na escala de Fanger PMV foi feita, quando os sistemas de AVAC encontram-se activos, o índice PMV situa-se no intervalo de 0.5 a 0.6, intervalo este compreendido e próximo do definido como “ar neutro”, no número de horas de desconforto que neste caso é igual a zero e no valor da humidade relativa sempre com um valor absoluto muito próximo dos 50%, graças ao controlo efectuado na UTA pelo humidificador e pelos “set-points” introduzidos, **valores estes óptimos e que atestam o comportamento térmico deste sistema base optimizado**, não necessitando o mesmo, **de qualquer equipamento adicional, face ao referido anteriormente.**

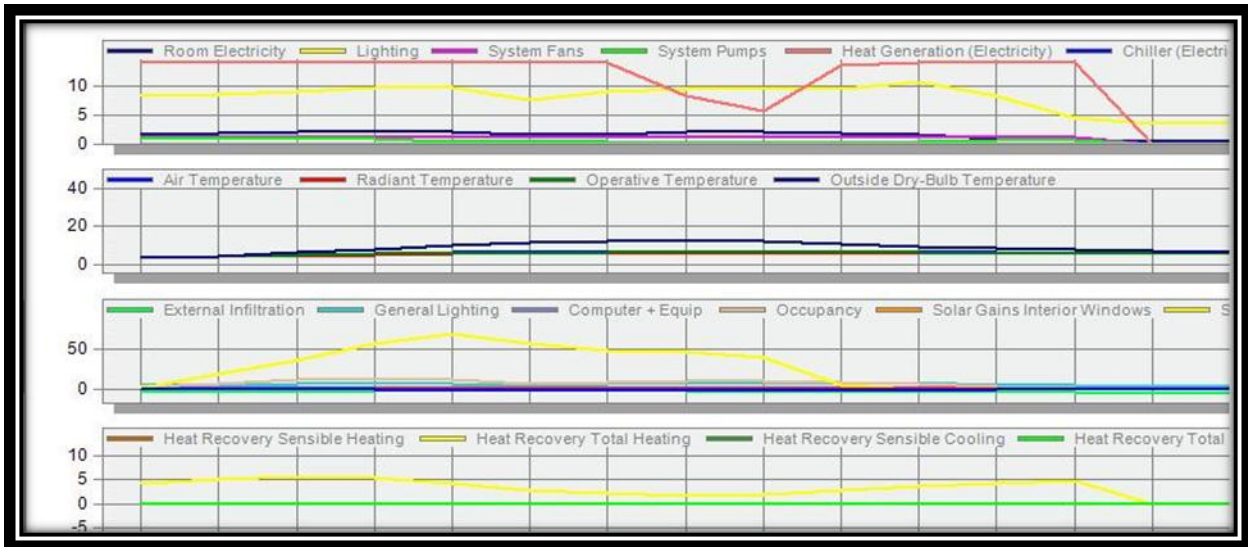


Figura 21 - Consumos eléctricos e a recuperação de calor efectuada na UTA, num dia típico de Inverno.

A figura 21 tem a finalidade de ilustrar o comportamento e a funcionalidade do recuperador de calor na estação de aquecimento, sendo que, **neste sistema a sua importância é vital**, ao recuperar parte da energia térmica vinda do ar de retorno e misturando-a, com o caudal de ar novo proveniente do exterior, possibilitando uma temperatura de insuflação no interior dos espaços bastante razoável, dispensando a bateria de aquecimento.

Abordando a variável temperatura interior, na estação de arrefecimento verifica-se que **não existe um controlo efectivo da temperatura interior do ar** nos diferentes espaços com este sistema, conforme é visível na figura 22, assinalado na elipse superior, verificando-se temperaturas do ar interior acima do esperado, pelo que, **é necessária a introdução de uma bateria de arrefecimento para auxiliar na remoção da carga térmica sensível e latente**, sendo possível visualizar na mesma figura, que em situação de arrefecimento e com os sistemas de AVAC operacionais, o valor da humidade relativa ronda o intervalo entre os 35% de valor mínimo e máximo de 45%, representado com a elipse inferior, valores estes, não muitos preocupantes, mas **não satisfatórios para o grau de conforto pretendido para este sistema base optimizado**.

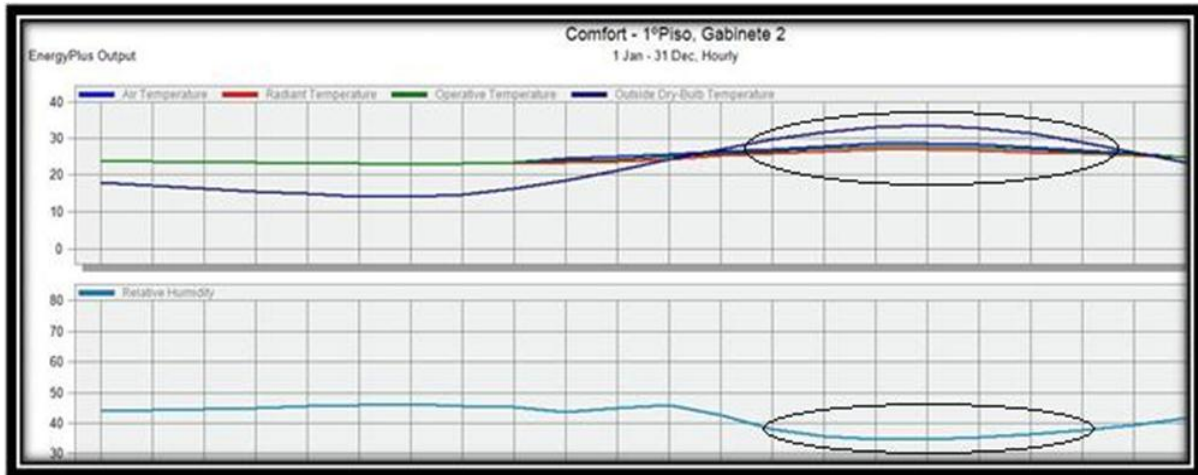


Figura 22 - Resultados obtidos da simulação dinâmica para a temperatura interior, operativa e radiante para o espaço designado como “Sala de reuniões” num dia típico de Verão.

Este facto é explicável devido ao facto de o tecto arrefecido apenas conseguir remover a carga sensível no interior do espaço, pelo que era expectáveis valores nesta gama de grandeza para esta variável. Com o propósito de controlar a carga sensível na estação de Verão, será introduzida uma bateria de arrefecimento, alimentada a água fria na UTA que permita um maior controlo na temperatura interior dos diferentes espaços, pelo que é expectável que o tecto arrefecido não necessite agora de uma potência de arrefecimento tão elevada, sendo que essa potência foi definida como máxima de 70 W/m^2 , uma limitação dos sistemas de tectos arrefecidos.

O recurso ao *“free-cooling”* na estação de arrefecimento, nos períodos onde o sistema de AVAC se encontra inibido, convém analisar separadamente, visto que, apesar de ser possível controlar a temperatura no interior dos espaços fora do período de ocupação, a inclusão do arrefecimento gratuito fomenta um aumento no consumo de ventilação.

Para tal, o conjunto de imagens seguintes, pretende ilustrar o comportamento térmico dos espaços climatizados na estação de arrefecimento, para um dia da semana com os sistemas de AVAC em operação e, num fim-de-semana, em que os sistemas de climatização encontram-se desligados. Tratando-se de vários espaços climatizados, com necessidades térmicas de arrefecimento, em períodos temporais bastantes semelhantes e, para não sobrecarregar a presente tese, foi escolhido o espaço designado como “Auditório”, para proceder à análise atrás descrita, servindo esta análise para generalizar o comportamento térmico nos outros espaços afectos ao sistema de climatização.

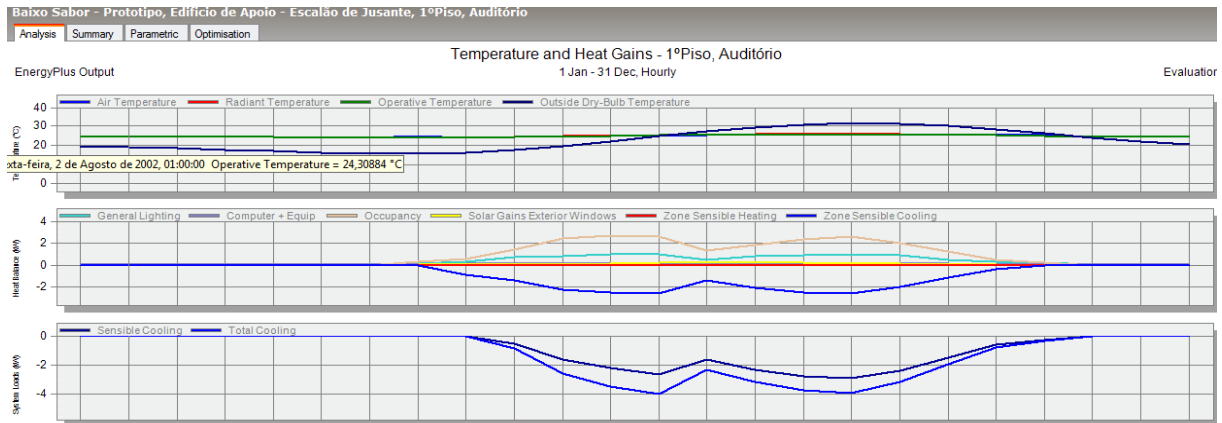


Figura 23 – Comportamento térmico e necessidades de arrefecimento no dia de 2 de Agosto (sexta-feira) para o espaço designado como “Auditório” com os sistemas de AVAC em operação.

Quando os sistemas de AVAC não se encontram activos, a temperatura do ar interior nos espaços climatizados é bastante agradável, conforme pode ser visualizado na figura 23, valor este igual a 24.3°C, pelo que se visualizarmos nas curvas das necessidades de arrefecimento do espaço constata-se dois aspectos importantes e, que já foram comentados anteriormente em análises antecedentes a esta.

O primeiro é o “arranque” do *chiller*, que como se pode ver na parte inicial da curva, possui a menor inclinação da mesma, significando que o seu arranque é suave e que o sistema inicialmente não necessita de grandes necessidades de arrefecimento. O outro factor decisivo é a capacidade da envolvente ou a inércia térmica interior em regular a temperatura interior, garantindo uma temperatura interior de conforto fora das horas de funcionamento do sistema de climatização.

A análise e as relações atrás mencionadas são de bastante importância e utilidade, visto que, realçam a **não necessidade de efectuar “free-cooling” no período semanal, não se justificando a inclusão do mesmo**, pois iríamos fomentar o aumento dos consumos referentes à parcela dos ventiladores, sem benefício algum, pelo que, a mesma solução se encontra excluída neste período de tempo.

Ao analisarmos a situação ocorrida ao fim-de-semana e conforme é visível na figura 24, o comportamento térmico do espaço já não é tão similar ao apresentado na figura 23.

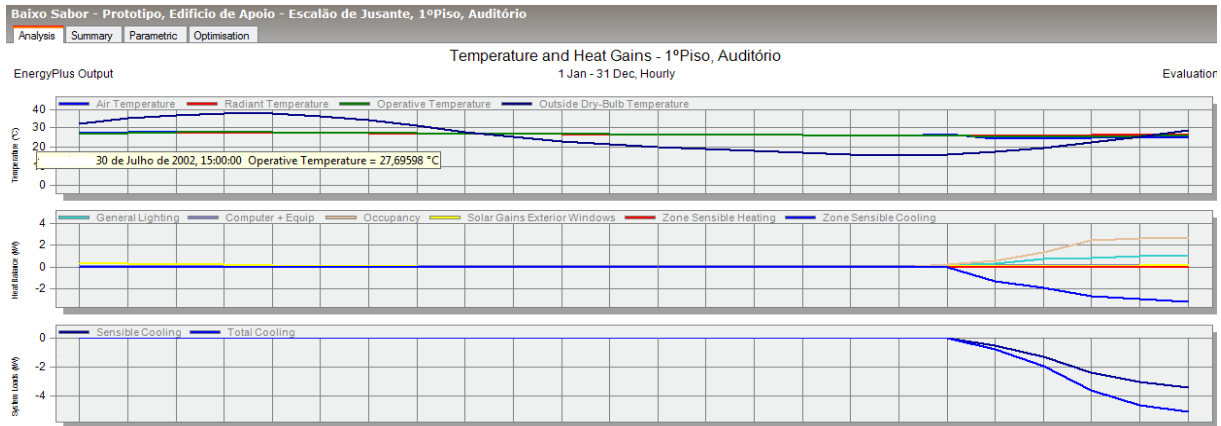


Figura 24 - Comportamento térmico e necessidades de arrefecimento no dia de 30 de Julho (fim-de-semana) para o espaço designado como “Auditório” com os sistemas de AVAC desligados.

Ao visualizarmos a figura 24 verifica-se um aumento da temperatura interior ao fim-de-semana, justificável com a inactividade dos sistemas de AVAC neste período, sendo que o edifício poderá atingir temperaturas interiores próximas dos 28°C, no entanto se analisar a ocorrência desse pico verifica-se que o mesmo ocorre quando a temperatura exterior é máxima e superior à temperatura interior, ficando inibida a solução do arrefecimento gratuito neste período de tempo.

Ao analisarmos a mesma figura verifica-se que existe um amplo intervalo de tempo onde ocorre que a temperatura interior é bastante superior à do exterior, no entanto mais uma vez o “*free-cooling*”, que à primeira vista poderia parecer uma óptima solução para promover um abaixamento da temperatura interior e com isso diminuir a energia necessária no arranque do *chiller* no início da semana não é necessário, pois mais uma vez a inércia térmica interior regula a temperatura interior do edifício para valores muito próximos da temperatura de conforto de 25°C, pelo que a adopção do “*free-cooling*” ao fim-de-semana fica também automaticamente excluída.

11. Estudo de novos sistemas de climatização

11.1. Sistema VRF “Heat Pump”

Um dos sistemas propostos e assume-se como alternativa ao sistema base estudado é o sistema VRF com condensação a ar e *inverter*. O sistema VRF estudado será um sistema a dois tubos no modo “*Heat Pump*” ou bomba de calor. O COP e o EER foram calculados de acordo com as tabelas técnicas fornecidas pelo fabricante consultado e de acordo com a variação da temperatura do ar exterior. O valor do COP calculado é 4,4 e do EER de 5.8.

Primeiramente e dando sequência ao que foi referido no capítulo anterior 10.4.1, a análise aos resultados obtidos através do *software* DB e utilizando a nomenclatura do programa, será para hipótese “*Air Loop Unitary Heat Pump – Air to Air*” com bateria de aquecimento e arrefecimento de expansão directa com várias velocidades. Conforme justificado em anexo, esta opção não permite a simulação do sistema VRV® com recuperação de calor. A figura seguinte pretende ilustrar o esquema de princípio utilizado para modelar o sistema de climatização proposto.

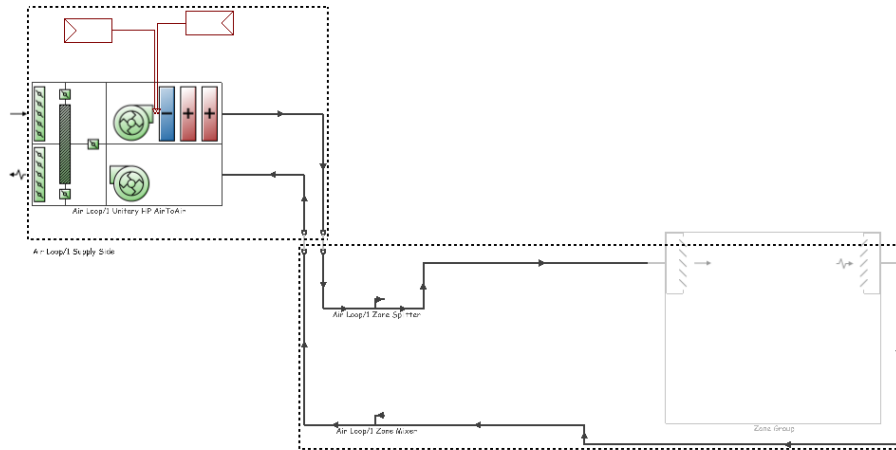


Figura 25 - Representação do esquema de princípio proposto para simular o sistema VRF® "Heat Pump" utilizando para o efeito uma "Air Loop Unitary Heat Pump – Air to Air" – Software: Design Builder – Módulo: "HVAC Detailed".

11.1.1. Resultados obtidos

Os resultados obtidos para o consumo energético anual do sistema VRF "Heat Pump" são apresentados no gráfico 12, sendo o mesmo desagregado, para se proceder a algumas comparações em relação ao sistema AVAC otimizado. De salientar e de acordo com o procedido com o sistema AVAC otimizado, as medidas com vista à optimização dos consumos energéticos, estão também incluídas neste sistema, as que são aplicáveis.

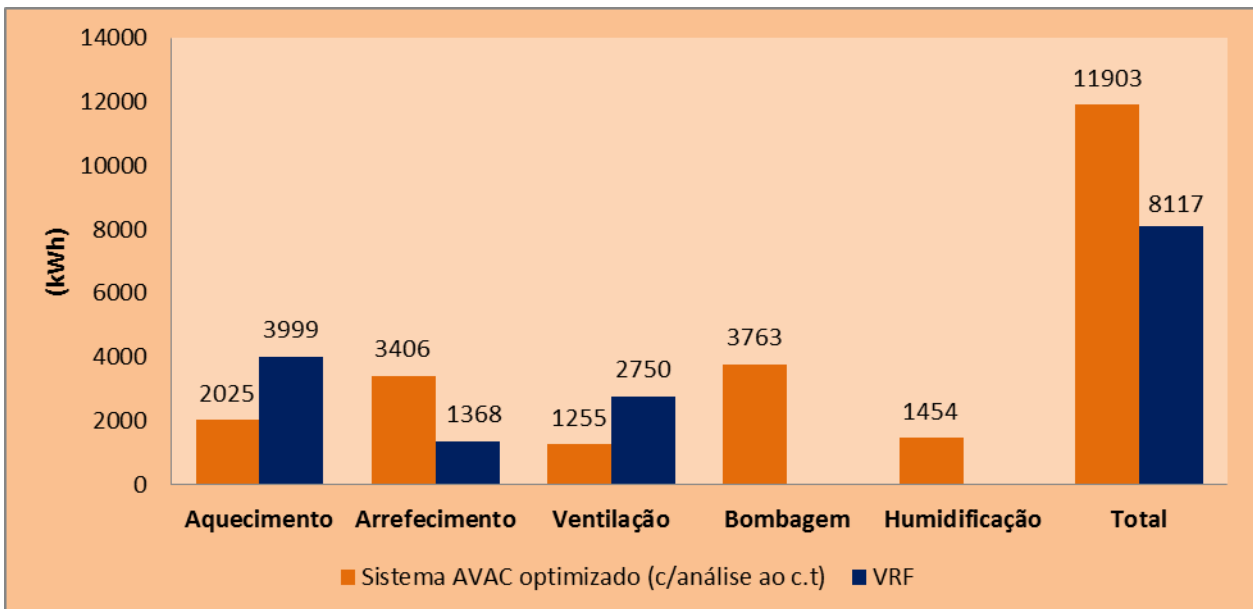


Gráfico 12 – Comparação e desagregamento dos consumos energéticos globais de AVAC entre o sistema AVAC otimizado e o sistema VRF.

O sistema VRF, globalmente é mais eficiente do que o sistema AVAC optimizado em cerca de **31.8%**, e em relação ao sistema AVAC base cerca de **61%**, traduzindo-se, à primeira vista, em reduções energéticas impressionantes face aos outros sistemas de climatização.

Ao analisarmos os consumos energéticos desagregados, constata-se alguns aspectos importantes, como por exemplo a ausência de consumos na componente do AVAC referente à bombagem e humedificação. Ao passo que na bombagem o resultado teria que ser igual a zero para o sistema VRF, constituindo a mesma parcela a maior redução do consumo energético face ao sistema optimizado, a ausência de consumo energético na humedificação, o caso já é bem diferente.

O consumo referente ao sistema VRF é igual a zero, não pelo mesmo não necessitar de um controlo ao nível da humedidade relativa/absoluta, mas sim por impossibilidade do próprio sistema que, por ser de expansão directa e sem módulos de humedificação não permite um controlo efectivo de humedidade. Para tal, ao sistema VRF teriam de ser adicionados humedificadores que à partida, irão impor um incremento em humedidade, visto que um sistema deste tipo em que o ar entra em contacto com baterias a temperaturas muito baixas vai ter um grau de desumedificação superior.

Como tal existem algumas condicionantes que convém abordar como o controlo da temperatura e humedidade relativa interior. O próximo capítulo apresenta uma análise a estes dois parâmetros.

11.1.2. Análise aos resultados obtidos

Em relação à parcela do aquecimento, o sistema VRF é mais dispendioso energeticamente, face ao sistema optimizado, constituindo a par da ventilação, as subidas nos consumos energéticos desagregados de AVAC. A explicação passa pelo modo de transferência de calor empregue pelos dois sistemas de AVAC.

No sistema VRF, **a transferência de calor é maioritariamente realizada por processos convectivos**, no sistema optimizado, a mesma se realiza pelo processo de radiação, pelo que este, permite relativamente ao sistema convectivo, a vantagem de trocar directamente calor com os ocupantes, sem a necessidade do ar como meio de transporte, o que permite reduzir o consumo de energia associado ao deslocamento do ar, isto é, da parcela da ventilação conforme os resultados obtidos da simulação dinâmica.

Analisando agora, o consumo energético do sistema VRF, **referente à parcela do arrefecimento**, verifica-se que é mais baixo no sistema VRF face ao caso optimizado. Uma das razões é de análise directa, e está relacionada com o rácio na eficiência energética (EER), que no caso do VRF é superior face ao caso optimizado, contribuindo para uma redução energética no sistema VRF, o que por exemplo, não acontece no aquecimento, em que os COP's dos dois sistemas são iguais.

A outra razão é que o sistema VRF, tipicamente, é um sistema eficiente, no entanto, o caso optimizado sai prejudicado nesta parcela, visto que utilizando o sistema radiativo, o mesmo e conforme anteriormente referido, tem uma potência máxima de refrigeração nos tectos diminuta face às necessidades reais do edifício, necessitando de uma bateria adicional, a qual permitiu

complementar o tecto arrefecido nas necessidades de arrefecimento requeridas, incrementado o consumo energético no sistema de AVAC optimizado.

11.1.3. Considerações à obtenção dos resultados

A importância do controlo da humidade relativa, na estação de arrefecimento é evidente nas próximas figuras, pelo que adição de um humidificador neste sistema de climatização é realmente necessária, principalmente na estação de arrefecimento conforme ilustra a figura 27, **pelo que o consumo teórico deste sistema será mais elevado do que é apresentado no gráfico 12.** Analisemos as figuras seguintes, que pretendem elucidar o que foi dito anteriormente. Começemos por analisar a figura 26 que pretende apresentar o perfil da humidade relativa interior na estação de aquecimento.

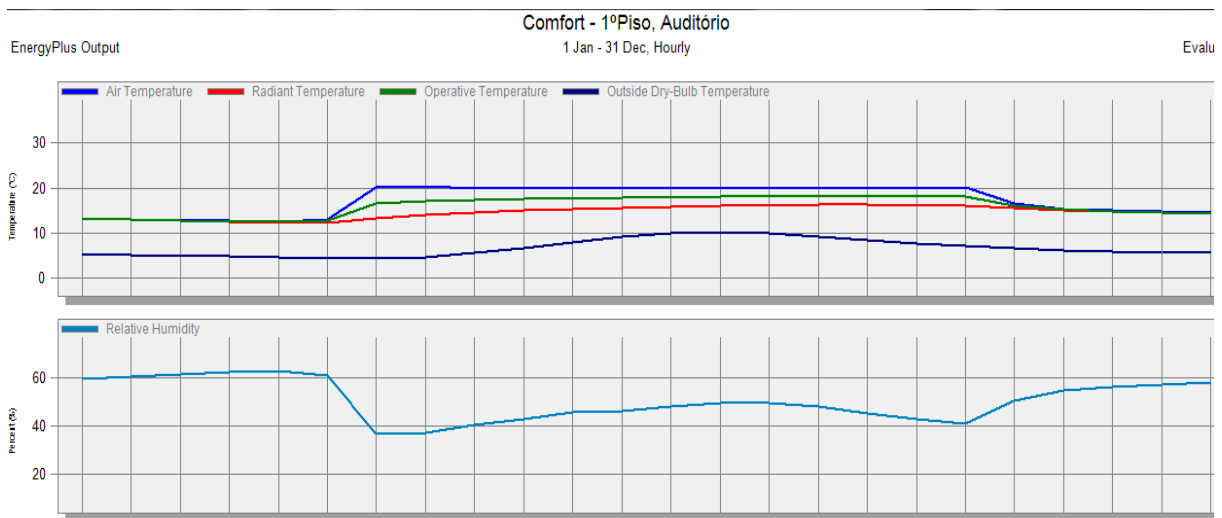


Figura 26 - Resultados obtidos pela simulação dinâmica na opção “Comfort” do software Design Builder, no dia 3 de Janeiro, quinta-feira e com o sistema de AVAC em funcionamento para o espaço designado como “Auditório”

Conforme é perceptível na figura anterior e a compararmos por exemplo com a figura 19, onde é possível visualizar o controlo de humidade relativa realizado pelo sistema AVAC optimizado na estação de aquecimento para o mesmo espaço, verifica-se que o sistema optimizado mantém a humidade relativa interior num valor muito próximo dos 50%, em relação ao sistema VRF essa situação já não é verdadeira, no entanto, e como pode ser visualizado na figura 26, verifica-se que a gama de valores da humidade relativa interior, pertence ao intervalo entre 38% a 52%, pelo que também se conclui através da figura 26, que ao não incorporar qualquer tipo de controlo específico de humidade na estação de aquecimento, consegue-se uma gama de valores bastante satisfatórios, não comprometendo o conforto térmico dos ocupantes nesta estação do ano.

No entanto, o cenário na estação de arrefecimento é bem diferente ao registado na estação de aquecimento, conforme ilustra a figura 27, **podendo os valores da humidade relativa variar no intervalo compreendido entre os 10% a 42%**, intervalo este inaceitável.

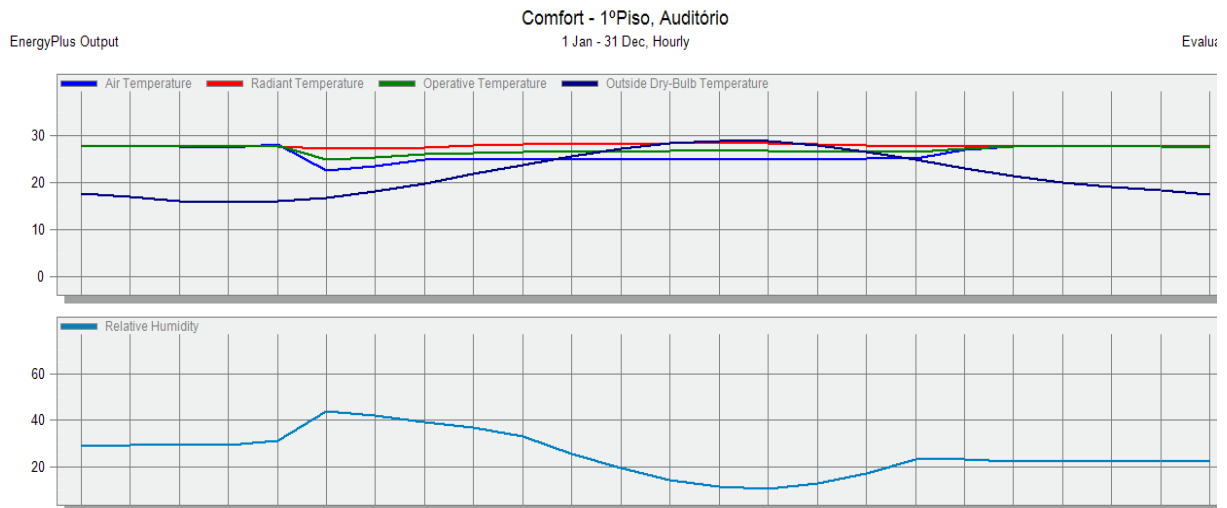


Figura 27 – Resultados obtidos pela simulação dinâmica na opção “Comfort” do software Design Builder, no dia 13 de Julho, quinta-feira e com o sistema de AVAC em funcionamento para o espaço designado como “Auditório”

A solução de incorporar um humidificador para proceder a este reajuste poderia ser simulada, no entanto, por impossibilidade do *software Design Builder*, o mesmo não permite a combinação de humidificadores com o sistema VRF, no entanto, existe outra opção que pode encaixar na perfeição neste caso, que era a utilização de um recuperador de calor entalpático, permitindo parte da recuperação do calor latente proveniente do ar de extracção e com isso um maior controlo no parâmetro relacionado com a humidade relativa interior. A figura 28 apresenta os novos valores para a humidade relativa interior, na estação de aquecimento.

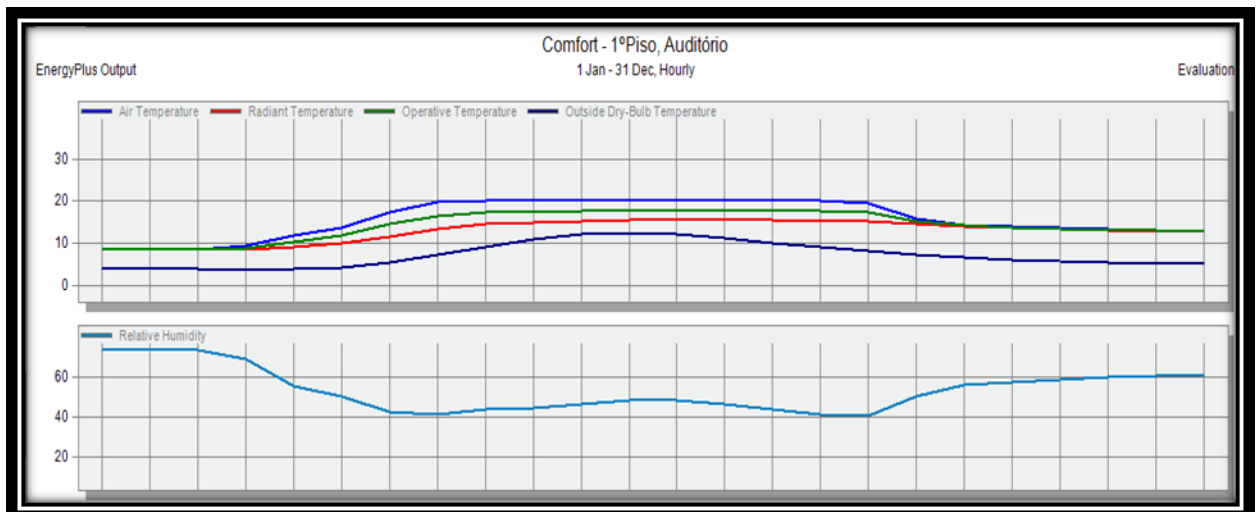


Figura 28 - Resultados obtidos pela simulação dinâmica na opção “Comfort” do *software Design Builder* no dia 3 de Janeiro incluindo o recuperador de calor rotativo, quinta-feira e com o sistema de AVAC em funcionamento para o espaço designado como “Auditório”.

Para visualizar o efeito do recuperador rotativo, a figura 28 e 29 são nos mesmos dias, em que foram analisados a figura 26 e 27 para o sistema VRF, sem o mesmo. A escolha de igualar nos dias

analisados anteriormente, tem o objectivo de facilitar a comparação de com e sem o recuperador. Na estação de aquecimento não existe praticamente diferença entre o caso com o recurso ao recuperador e sem o mesmo.

No entanto na estação de arrefecimento a situação já é bem diferente conforme é apresentado na figura 29.

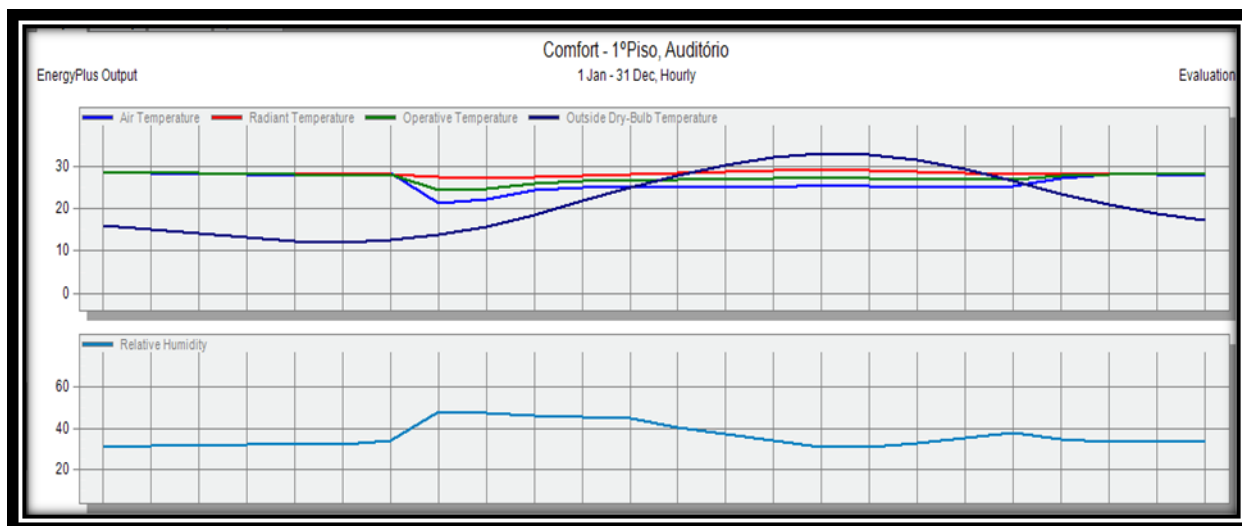


Figura 29 - Resultados obtidos pela simulação dinâmica na opção “Comfort” do software Design Builder no dia 13 de Julho incluindo o recuperador de calor rotativo, quinta-feira e com o sistema de AVAC em funcionamento para o espaço designado como “Auditório”.

Se recuarmos no que foi dito anteriormente, para a humidade relativa interior no caso de não incorporar o recuperador rotativo, o intervalo possível de valores situava-se numa gama que oscilava os 10 a 42%.

Com a utilização do recuperador entalpático, consegue-se um maior controlo na humidade relativa interior, reduzindo-se a amplitude desse mesmo intervalo, conforme o pretendido, sem incorrer num aumento significativo do consumo energético (**sendo que o consumo do motor eléctrico responsável pela rotação do roda é compensado pela redução no consumo de energia no aquecimento que baixou cerca de 15%**), estando agora os valores da humidade relativa interior, num intervalo de valores mais pequena, que oscila entre o **mínimo de 31% e o máximo de 48,3%**. Não sendo valores de eleição, como acontece, no caso do sistema optimizado, esta gama de valores já entra numa fasquia, que permite dizer, que o conforto térmico não será tão comprometido, como acontecia na situação sem a utilização de um recuperador rotativo, principalmente na gama de valores originados na estação de arrefecimento, no entanto uma coisa é certa, **a taxa de PPD será sempre superior no sistema VRF face ao sistema optimizado**, pelo que, para garantir um conforto térmico equitativo nos dois sistemas, o **sistema VRF verá certamente os seus consumos aumentarem**.

11.2. Sistema “Green-System”

Conforme é referido anteriormente, no capítulo 5 - “Caso em estudo”, outro sistema que será alvo de análise e comparação relativamente aos sistemas de AVAC estudados anteriormente, é o sistema designado por “**Green System**”, assim denominado por corporizar uma tentativa de minimizar todos os consumos de energia de fonte não renovável, uma aproximação aos edifícios “**NZEB**” com baixas emissões de CO₂, pelo que, ao contrário das análises anteriormente realizadas, este sistema não visa a redução de consumos energéticos, mas sim a procura de uma fonte de energia alternativa, de origem renovável ou da recuperação de rejeição de calor, mantendo-se assim, todos os consumos energéticos.

Nesse sentido a produção de água fria é realizada por um **chiller de absorção**, sendo que água quente necessária para o mesmo, produzida através de energia limpa (**colectores solares de tubo de vácuo com apoio de uma caldeira a pellets**) e o aquecimento é efectuado aproveitando a **água do circuito de refrigeração do equipamento principal dum aproveitamento hidroeléctrico, a Turbina**. Para tornar o sistema 100% “verde”, será ainda implementado um **pequeno campo solar fotovoltaico** para compensar os consumos eléctricos referentes à caldeira a *pellets* e ao próprio chiller de absorção, apesar do consumo eléctrico do mesmo ser bastante inferior face ao *chiller* água-água utilizado no sistema optimizado.

O objectivo principal deste sistema é ser o mais eficiente possível, combinando os recursos energéticos/térmicos disponíveis no complexo energético com as características e tipologia do presente caso em estudo.

Ao recorrer ao uso de energias limpas interligado com um **chiller de absorção** pretende-se também **reduzir as emissões de CO₂** enviadas para a atmosfera, pelo que num sistema com caldeira a *pellets* e energia solar, a análise não poderá passar só pelo resultado energético anual em si e o investimento inicial necessário para a implantação do mesmo, mas sim incorporar uma nova análise e comparação sobre o benefício ambiental que um sistema deste pode trazer face aos anteriores estudados.

Convém salientar, que apesar de este sistema **recorrer unicamente a energias alternativas na produção de energia térmica** durante todo o ano, **existirá sempre um consumo energético associado à electricidade**, que de igual modo acontecia no sistema homólogo a este, o sistema optimizado, que é parcela de consumos energéticos referente à humedificação do ar, à ventilação dos espaços e à bombagem de água para os diferentes equipamentos do sistema, pelo que a única solução para o tornar totalmente verde seria alargar o campo solar fotovoltaico (ou eólico por exemplo) e aumentar a potência de pico do mesmo para cobrir as necessidades energéticas atrás referidas. No entanto, uma solução destas ficaria excessivamente dispendiosa, obrigando a grandes investimentos iniciais o que a torna inviável do ponto de vista económico.

Deve-se referir que a análise deste sistema e conforme é feita por etapas que visam implementar um sistema energeticamente eficiente mas onde a componente da viabilidade económica seja maximizada. Não podemos dissociar, que estamos perante tecnologias disponíveis no mercado, mas que actualmente não têm grande expressão no mercado nacional sendo equipamentos sempre com preços elevados e que comprometem a rentabilização energética/económica do

sistema. Conforme pode ser visualizado no capítulo referente à viabilidade económica, a **escolha do sistema produtor de energia térmica** responsável por fornecer ao *chiller* a água quente necessária ao processo será influenciado pela sua viabilidade económica.

11.2.1. Resultados obtidos

O sistema “*Green-System*” proposto assume-se, então, como alternativa ao sistema de climatização otimizado estudado e o VRF, no sentido que pretende otimizar ainda mais os mesmos, recorrendo ao mesmo tempo a energias alternativas com o objectivo da redução do número de emissões de CO₂ conforme é apresentado no gráfico 13.

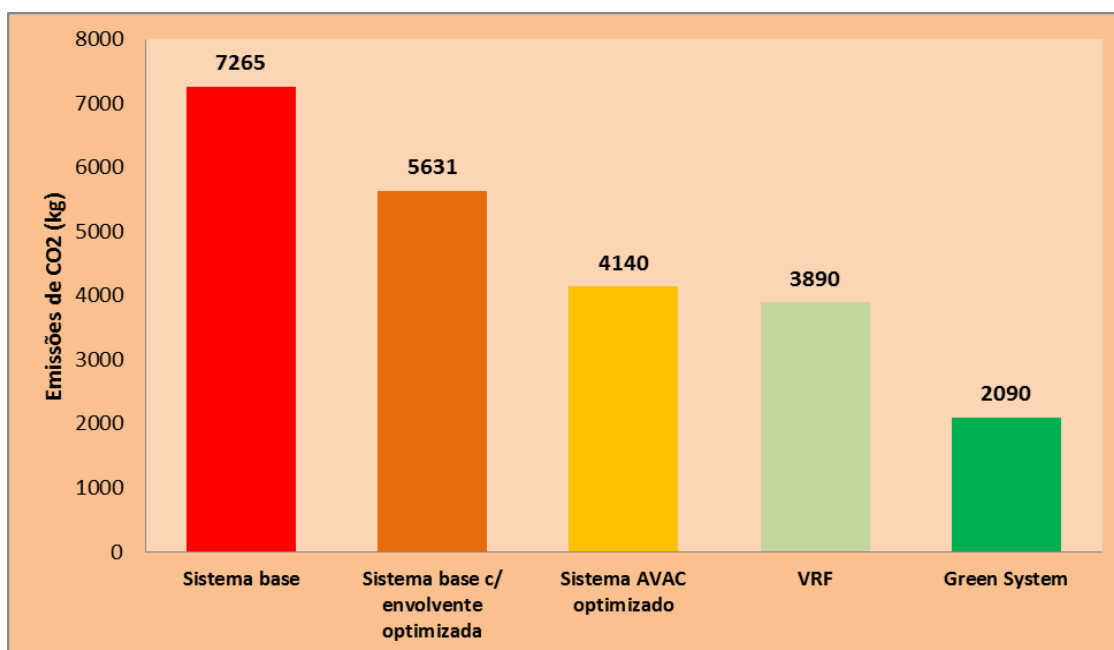


Gráfico 13 – Emissões de CO₂ dos diferentes sistemas de climatização estudados.

De acordo com os resultados obtidos, verifica-se que o sistema “*Green System*” reduz o número de **emissões de CO₂** em cerca de **71.2%**, **62.8%**, **49.5%** e **46.2%** em relação aos sistemas AVAC base, base com a envoltante otimizada, o sistema AVAC otimizado e o sistema VRF, respectivamente.

Em relação aos consumos energéticos de origem fóssil, o gráfico 14 apresenta os resultados obtidos.

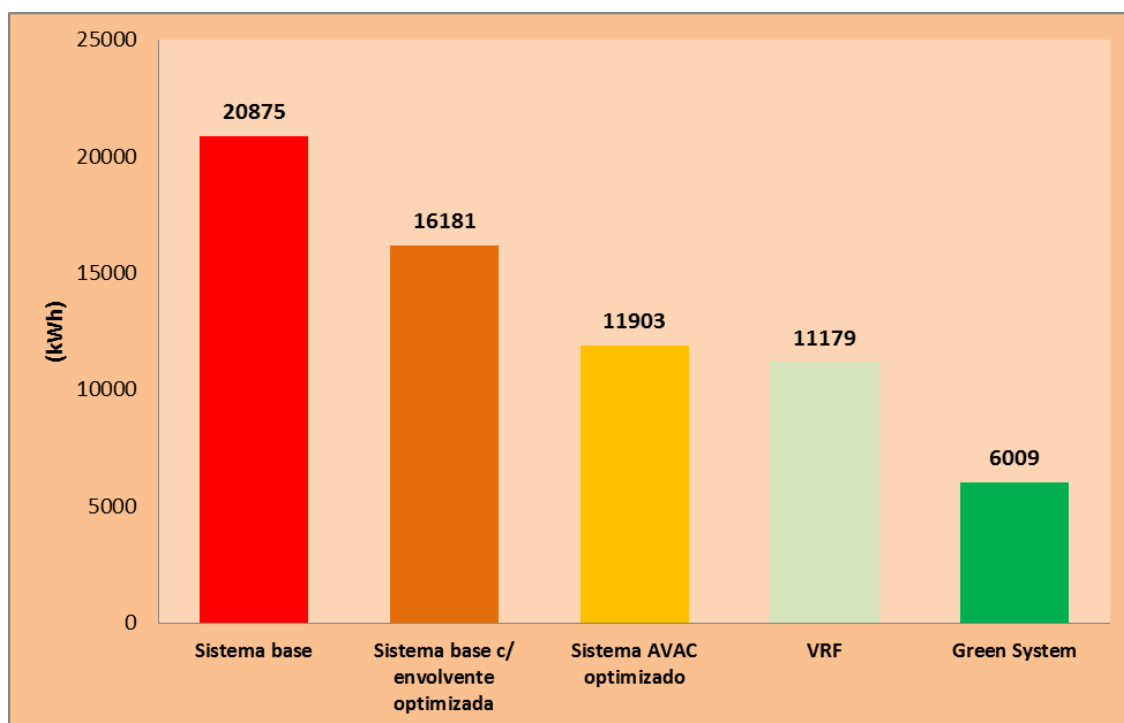


Gráfico 14 – Comparação das necessidades energéticas anuais com recurso a energias de origem fóssil dos diferentes sistemas de climatização

A dependência do sistema “*Green System*” em **energias de origem fóssil** e de acordo com os valores apresentados no gráfico 14 é muito menor que nos restantes sistemas, verificando-se que existe uma redução na sua procura de **71.2%, 62.8%, 49.5% e 46.2%** em relação aos sistemas AVAC base, base com a envoltente optimizada, o sistema AVAC optimizado e o sistema VRF, respectivamente.

11.2.2. Considerações à obtenção dos resultados

O sistema “*Green-System*” proposto assume-se, então, como alternativa ao sistema optimizado estudado no sentido que pretende optimizar ainda mais o mesmo, recorrendo ao mesmo tempo a energias alternativas. Na estação de aquecimento ao recuperar parte da energia térmica que ia ser dispensada e não recuperada no circuito de refrigeração da turbina e recuperar essa mesma energia para o sistema de climatização, não só estamos a optimizar o sistema de AVAC energeticamente mas também o próprio aproveitamento hidroeléctrico ao fazer um “*Heat Recovery*” à turbina.

Esta solução torna-se praticamente perfeita, no entanto, devemos questionarmos: “Quando é que o sistema de AVAC necessita mais desta energia térmica? Será que temos sempre esta energia disponível, isto é, a central hidroeléctrica estará sempre a turbinar?”

Analisando este sistema verificamos que a recuperação de energia térmica efectuada servirá para o ano todo, pois este sistema está vocacionado ou necessita durante o ano todo de uma fonte quente, no entanto o que difere ao longo do mesmo é a qualidade da energia térmica necessária, sendo este aspecto bastante curioso porque tradicionalmente temos nos sistemas de climatização

preparação de água quente na estação de aquecimento e fria na estação de arrefecimento, no entanto no sistema “*Green-System*” a situação é bem diferente, sendo que é necessário **sempre e só** de água quente durante todo ano e mais “*sui generis*” ainda, é que **necessitamos de temperaturas da água mais elevadas no Verão do que no Inverno**, devido à incorporação no sistema do *chiller* de absorção, o que torna este sistema único e bastante interessante de analisar.

O horário de funcionamento típico de uma turbina pertencente a um aproveitamento hidroeléctrico é das 7/8h até às 20h, pelo que tem o mesmo período de funcionamento dos sistemas de climatização estudados. A título de curiosidade, neste aproveitamento hidroeléctrico as duas turbinas montadas são reversíveis pelo que o horário de funcionamento delas será alargado à madrugada, mas agora não a turbinar, mas sim a bombear a água do rio no sentido inverso e assim aproveitar o excesso típico de energia renovável proveniente das eólicas registado de madrugada.

No entanto, o sistema “*Green-System*” proposto, pode mesmo assim responder em situações em que a turbina por razões doutra ordem não funcione. Por recurso da “caldeira a *pellets*” para a preparação de água quente que no Verão eleva a temperatura da água para o valor requerido pelo *chiller* de absorção, caso os painéis solares não consigam a elevar para a temperatura requerida, sendo este equipamento, em qualquer das estações (aquecimento/arrefecimento) **uma reserva para situações excepcionais e não para o uso corrente.**

Para o estudo deste sistema de AVAC pode-se dizer que ele é composto essencialmente por duas etapas, a primeira e conforme referida anteriormente, pela simulação dinâmica do mesmo no *Energy Plus*. Os valores obtidos através desta simulação servirão para avaliar quais as necessidades energéticas do sistema de climatização, principalmente as do *chiller* de absorção. A diferença em relação às outras simulações é que o consumo energético global do sistema de AVAC obtido terá uma nova componente, a parcela do arrefecimento relativamente ao *chiller* de absorção e tais necessidades são térmicas e não eléctricas. Após a obtenção dos resultados através do *Energy Plus* foi necessário utilizar o *software* do INETI, o SolTerm para auxiliar no cálculo da área colectora solar para fornecimento da energia térmica necessária para o funcionamento do *chiller* de absorção.

Para a simulação dinâmica foi considerado um *chiller* de absorção de simples efeito com um COP igual a 0.7. A temperatura da água à entrada do *chiller* e torre de arrefecimento considerada foi de 90°C e 35°C respectivamente. Os painéis solares térmicos têm como objectivo captar a energia térmica necessária para o funcionamento do *chiller* de absorção na estação de arrefecimento. **Todo o sistema responsável pelo tratamento e difusão do ar tem por base o sistema AVAC optimizado.**

A estratégia na parte solar térmica passou por dimensionar o sistema para cobrir as necessidades energéticas nos meses de maior produção, sendo que, para os restantes a energia em défice necessária seria obtida pela caldeira, no entanto, a estratégia teve que ser modificada, devido aos resultados obtidos, que pode ser consultado na secção dos “Anexos”, no capítulo C1 intitulado como “Resultados SOLTERM”. Consultando a parte dos anexos da tese, verifica-se por exemplo, para uma área de colectores solares térmico de 81 m², consegue-se uma fracção solar de 71.3%, no entanto, a área de colectores solares é extremamente alta, **inviabilizando por completo este**

sistema a nível económico. Para tal, foi equacionado o “papel” da **caldeira a pellets**, pelo que, optou-se após uma análise aos resultados obtidos, de compensar a energia térmica necessária proveniente dos colectores solares térmicos, com uma utilização mais regular da caldeira, de forma a diminuir a área dos mesmos e tornar este sistema mais competitivo do ponto de vista económico.

No entanto, no capítulo 13 dedicado à viabilidade económica, no subcapítulo 13.2 dedicado aos sistemas de climatização, a análise sobre o sistema “*Green System*” terá duas vertentes, a primeira combinando o recurso da energia solar térmica com o apoio da caldeira e a segunda, assentando no pressuposto de utilizar apenas a caldeira a *pellets* como produtor de energia térmica, promovendo uma maior rentabilização do sistema e **beneficiando também da vantagem de ser um equipamento produtor de energia térmica amigo do ambiente, considerando que este completa o ciclo de carbono.**

Após nova análise em que se diminui a área de colectores solares, conclui-se **que a opção de adoptar a caldeira a pellets como único equipamento para a produção de água quente é a mais viável, pelo que a estratégia definida foi essencialmente motivada por aspectos de carácter económico.**

Para tornar o sistema produtor de energia térmica totalmente “verde” e por esta solução não representar um custo significativo ao mesmo, foi implementada uma pequena central solar fotovoltaica, com o intuito de compensar os pequenos consumos eléctricos necessários para o funcionamento da caldeira a *pellets* e do *chiller* de absorção. Na secção dos anexos, no subcapítulo intitulado de “Equipamentos Solar” pode ser consultado a ficha técnica da central fotovoltaica e da caldeira, onde pode ser visualizado o consumo eléctrico da mesma, que ronda o intervalo de 150 a 180 kWh.

12. Conforto térmico interior

12.1. Norma ISO 7730

12.1.1. Medidas correctivas à envolvente

Este subcapítulo tem o objectivo de estudar o conforto térmico interior nos espaços climatizados e servir de meio introdutório a um leque proposto de medidas de melhoria que visam garantir uma elevada eficiência energética no edifício. O estudo do conforto térmico será essencialmente vocacionado para as temperaturas de conforto interiores e relacioná-las com a norma ISO 7730, dedicada ao conforto térmico em edifícios.

Na actualidade é quase uma exigência os edifícios garantirem aos seus utilizadores um elevado nível de conforto, mas por outro lado a crescente procura e aumento do preço dos combustíveis fósseis e da electricidade leva-nos a ponderar e a racionalizar os consumos. **Será possível diminuir os consumos energéticos do edifício e manter os níveis de conforto dentro de intervalos razoáveis de acordo com a norma ISO 7730?** Este subcapítulo pretende responder à questão anterior para o caso em estudo.

Para o estudo do conforto térmico foram consideradas as medidas correctivas na envolvente decorrente das várias simulações. Numa primeira análise foi feita uma nova simulação com as medidas correctivas atrás propostas para toda a envolvente do edifício e verificou-se o valor das temperaturas do ar interior, operativas e radiantes para os espaços climatizados. O valor utilizado para a temperatura média radiante e interior correspondeu no Inverno e no Verão à média mensal fornecida no relatório do DB. A tabela 23 é um resumo do relatório fornecido pelo DB e espelha as temperaturas radiantes e interiores médias anuais para cada espaço climatizado.

Tabela 23 - Distribuição das temperaturas médias interior (cor-de-laranja) e radiante no Inverno e Verão.

Espaço	Inverno (°C)	Verão (°C)
Auditório	20.1/19.34	24.46/25.1
Gabinete 1	19.66/18.61	25.24/24.95
Gabinete 2	19.75/18.82	25.3/24.74
Gabinete 3	19.43/18.73	24.75/25.3
Sala de Comando	19.45/18.99	24.15/25.7
Sala de Reuniões	19.42/19.03	24.54/25.7

Para auxiliar no estudo do conforto térmico foi utilizado o *software* informático denominado de *Analysis* elaborado pela Universidade de Coimbra, Departamento de Engenharia Mecânica que permitiu quantificar o número de pessoas insatisfeitas. Conforme a norma ISO 7730, o conforto térmico de qualidade é aquele em que se gera um ambiente em que a percentagem de pessoas insatisfeitas é inferior a 10%, no entanto são consideráveis aceitáveis ambientes térmicos que geram até 20% de insatisfeitos, sempre que não se considere fundamental um grande rigor ao nível do controlo das condições térmicas. Após simulação no DB, a temperatura média radiante e interior, foi utilizada para averiguar a % de possíveis ocupantes desconfortáveis, valor este indicado de seguida na tabela 24.

Tabela 24 - Valor do PPD (%) para cada sala para a estação de aquecimento e arrefecimento.

Espaço	Inverno PPD (%)	Verão PPD(%)
Auditório	7.7	5
Gabinete 1	10.1	5.5
Gabinete 2	9.5	5.4
Gabinete 3	10.1	5.3
Sala de Comando	9.7	5.2
Sala de Reuniões	9.7	5.4

Da análise da tabela 24 verifica-se que na estação de aquecimento o índice de pessoas insatisfeitas ronda o valor de 9%, sendo feita a ponderação de % insatisfeitos entrando com área de cada espaço. Na estação de arrefecimento o índice de pessoas insatisfeitas ronda o valor de 5.2%, sendo feita a ponderação de % insatisfeitos com os mesmos pressupostos atrás referidos. Os valores obtidos na estação de aquecimento em relação ao PPD não serão alvo de revisão, visto que estamos num intervalo de insatisfeitos que nos garante um conforto térmico de qualidade. Já no arrefecimento o conforto térmico poderá ser considerado de excelência, pelo que serão revistos os valores das temperaturas interiores no sentido de equilibrar o rácio conforto térmico/energia consumida e diminuir o diferencial entre a temperatura interior e a exterior, reduzindo os consumos energéticos e a potência dos equipamentos de climatização. Os novos valores obtidos estão apresentados na tabela 25.

Tabela 25 - Valor revisto do PPD (%) para cada sala para a estação de arrefecimento.

Espaço	Verão PPD(%)	Temperatura interior revista (°C)
Auditório	9.9	25.9
Gabinete 1	9.7	26.2
Gabinete 2	9.9	26.4
Gabinete 3	9.9	25.9
Sala de Comando	10	25.4
Sala de Reuniões	10	25.5

Verifica-se que aumentando a temperatura interior nos espaços climatizados, consegue-se resultados bastante satisfatórios face à percentagem de pessoas insatisfeitas, num valor a rondar os 9.9% conforme é apresentado na tabela 25, sendo que a “balança” que mede o peso do conforto térmico e da racionalização da energia consumida penda mais agora para o lado da energia, o que não acontecia anteriormente.

As temperaturas interiores revistas tiveram como pressupostos de cálculo uma taxa de metabolismo igual a 1,2 MET por pessoa, uma resistência de vestuário de 0,5 Clo e que a velocidade do ar dentro do espaço de conforto não é superior a 0,2 (m/s) **conforme o RSECE**. Foi considerado que a temperatura radiante varia de acordo com a temperatura interior numa taxa constante. Com as temperaturas revistas para estação de arrefecimento realizou-se novamente uma simulação no *Design Builder* para quantificar a nível energético, os benefícios que esta medida pode trazer. Os resultados são apresentados no gráfico 15.

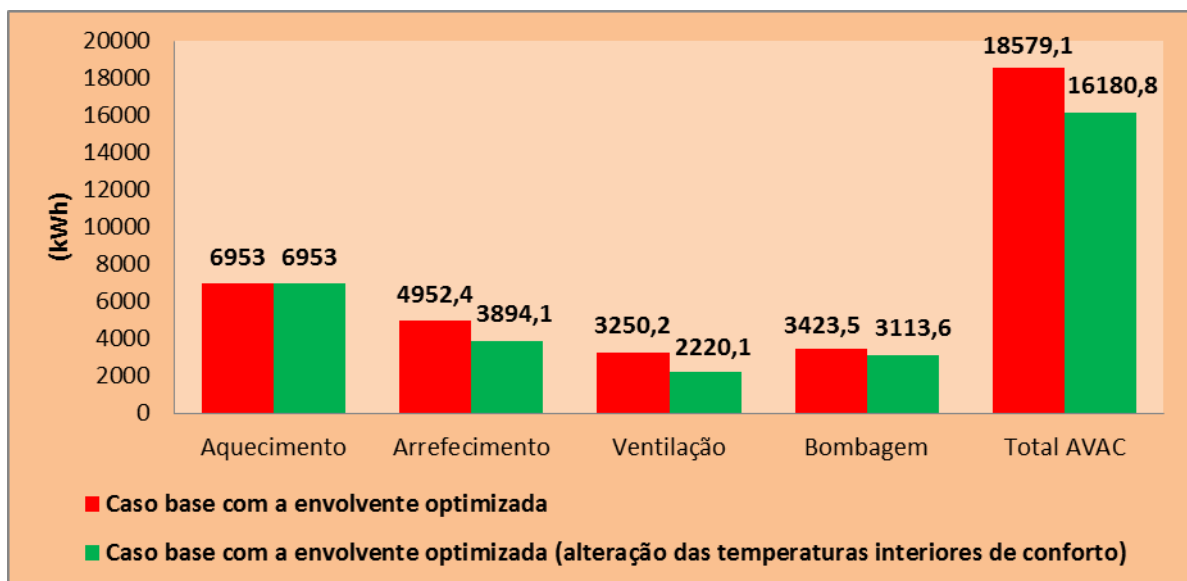


Gráfico 15 – Comparação do consumo eléctrico anual e desagregado do sistema de AVAC, do caso base com a envolvente optimizada e o mesmo afectado pela análise efectuada ao conforto térmico.

Aumentando a temperatura interior nos espaços climatizados, sem descurar no conforto térmico espectável, verifica-se uma redução nos consumos energéticos do sistema de climatização base, influenciado pela análise ao conforto térmico feita anteriormente, sendo este mais eficiente em cerca de **13%** face ao seu homólogo com temperaturas de interior definidas em projecto de 20°C e 25°C para o Inverno e Verão respectivamente. Como só se efectuou a variação

na temperatura interior na estação de arrefecimento, o consumo em aquecimento não sofreu alteração.

Verifica-se também, **que a maior descida percentual** no consumo energético desagradado é a componente da **ventilação**, sendo que para a descida desse valor, contribui **a unidade de tratamento de ar do auditório** que é de volume de ar variável e os **VC's** dos 3 gabinetes, também equipados com **ventiladores de velocidade variável**, que assistiram no caso da UTA referente ao auditório, a uma redução do caudal de ar movimentado necessário para o novo ajuste da temperatura interior e no caso dos VC's, a uma maior utilização da velocidade mínima, de três possíveis dos ventiladores. Deve-se referir que a UTA dedicada ao Auditório é a maior consumidora de energia eléctrica, visto possuir os ventiladores com maiores potências, para superar as perdas de carga da instalação e qualquer alteração efectuada neste equipamento, tem impactos energéticos na instalação substanciais, conforme é o caso.

A redução poderia ser maior, se a UTA **da Sala de Comando e Sala de Reuniões** fosse também de VAV, no entanto esta é de **VAC**, debitando o mesmo caudal de ar na estação de aquecimento e arrefecimento, pelo que, a variação nas necessidades de arrefecimento advêm desse mesmo factor, foi necessário bombear menos água a 7°C proveniente do *chiller* para ter o efeito pretendido e com isso, **o valor das necessidades de arrefecimento desceram em cerca de 21,4%**. Já na bombagem de água e humificação o consumo energético desceu, mas não tanto como nos outros casos, pelo que é justificável pelas bombas afectas ao sistema de AVAC, principalmente as de maior potência (excluem-se as bombas do circuito secundário de AVAC, estas sim são de velocidade variável, no entanto a nível de consumos energéticos têm pouca expressão face às restantes) serem todas de volume constante, não estando dotadas de variação de velocidade, pelo que ao existirem menos necessidades de arrefecimento, o caudal de água a movimentar vai ser igual, o que neste caso poderia ser reduzido variando a quantidade de água necessária.

12.1.2. Sistema AVAC optimizado

O estudo do conforto térmico será essencialmente vocacionado para as temperaturas de conforto interiores/operativas, relacionando com a norma ISO 7730, vocacionada para o conforto térmico em edifícios, no entanto à semelhança do que foi feito no sistema base com a envolvente optimizada, o mesmo estudo será feito para o caso optimizado. Todos os resultados anteriores consideraram como temperaturas interiores de conforto 20 e 25°C no aquecimento e arrefecimento respectivamente, no entanto, como foi verificado no capítulo anterior, referente as temperaturas interiores de conforto, as mesmas podem ser alteradas para valores que gerem um nível de desconforto não superior a 10% em consonância com o caso base com a envolvente optimizada.

No entanto, e reflectindo nos resultados obtidos no sistema base, onde as temperaturas interiores de aquecimento não foram alteradas por gerarem desde início uma taxa de desconforto térmico que rondava os 10%, duas perguntas podem-se colocar: **“Será que ao alterar os equipamentos terminais de climatização no interior das salas como acontece no sistema optimizado face ao sistema base, existe alguma interferência nas % de ocupantes descontentes? A forma como se transfere o calor no interior dos espaços terá interferência no**

PPD, que no sistema base é feita essencialmente por convecção e no sistema otimizado por radiação?

As análises efectuadas neste subcapítulo pretendem dar resposta a estas questões.

O valor utilizado para a temperatura média radiante correspondeu no Inverno e no Verão à média mensal fornecida no relatório do DB. A tabela com os valores obtidos encontra-se na parte dos “Anexos” desta dissertação. A tabela 26 é um resumo da anterior referida e apresenta as temperaturas radiantes médias anuais para cada espaço climatizado.

Tabela 26 - Temperaturas médias radiantes mensais na estação de aquecimento e arrefecimento.

Espaço	Inverno (°C)	Verão (°C)
Auditório	19.8	23.2
Gabinete 1	18.7	22.9
Gabinete 2	18.8	22.9
Gabinete 3	18.6	22.4
Sala de Comando	18.9	22.6
Sala de Reuniões	18.8	22.9

Para auxiliar no estudo do conforto térmico, foi utilizado novamente o software *Analysis*, que permitiu quantificar o número de pessoas insatisfeitas. Conforme a norma ISO 7730, o conforto térmico de qualidade é aquele em que se gera um ambiente em que a percentagem de pessoas insatisfeitas é inferior a 10%, o qual, será novamente o intervalo máximo admitido para a taxa de ocupantes desconfortáveis. As temperaturas interiores revistas tiveram como pressupostos de cálculo uma taxa de metabolismo igual a 1,2 MET por pessoa, uma resistência de vestuário de 0,5 Clo e que a velocidade do ar dentro do espaço de conforto não é superior a 0,1 (m/s). Foi considerado que a temperatura radiante varia de acordo com a temperatura interior modificada numa taxa constante. Os valores obtidos apresentam-se na tabela 27.

Tabela 87 - Valores das temperaturas interiores rectificadas e índice PPD (%) para cada sala para a estação de aquecimento e arrefecimento – Caso base otimizado (PPD < 10%).

Espaço	Temperatura interior (°C) / Inverno PPD (%)	Temperatura interior (°C) / Verão PPD(%)
Auditório	19.3/9.9	27/9.6
Gabinete 1	19.8/9.7	27.3/9.5
Gabinete 2	19.8/9.9	27.2/9.9
Gabinete 3	19.8/10.0	27.2/9.9
Sala de Comando	19.8/9.9	27.2/9.9
Sala de Reuniões	19.9/9.9	27.4/9.5

Utilizando as temperaturas interiores rectificadas foi efectuada uma nova simulação no software *Design Builder*, com o objectivo de quantificar o impacto desta medida no consumo energético anual do sistema de AVAC. O gráfico 16 compila e desagrega os consumos do sistema AVAC com base nas temperaturas interiores revistas.

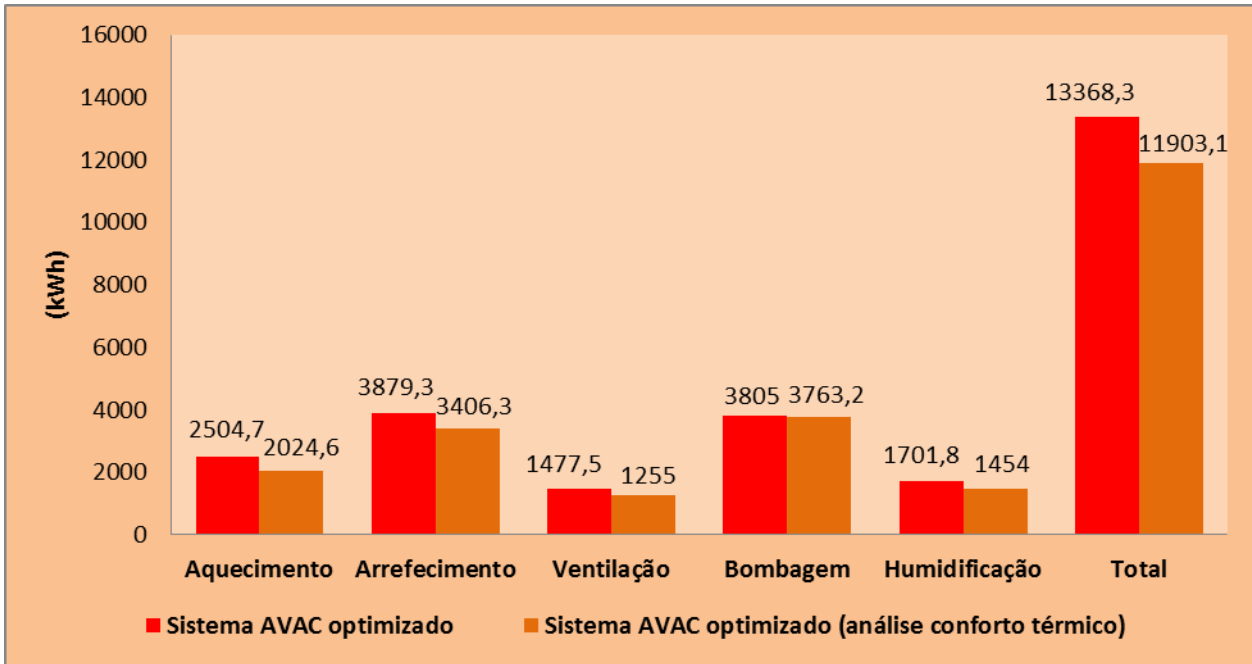


Gráfico 16 – Desagregação do consumo energético total do sistema de AVAC para o sistema de AVAC otimizado e para o mesmo, afectado pela análise ao conforto térmico.

Procedendo à análise do gráfico anterior, constata-se que todos os consumos desagregados referentes ao sistema de climatização baixam e que **a redução energética** no consumo total face ao sistema otimizado sem a análise ao conforto térmico é de **11%**. Estes resultados vão de encontro ao esperado e permitem averiguar que a escolha do grau ou nível de conforto térmico deve ser sempre reflectida, permitindo manter ambientes térmicos nos espaços climatizados agradáveis com a preocupação e o pensamento que o conforto térmico actualmente paga-se caro, e futuramente a tendência é para encarecer mais, pelo que terá que existir sempre uma ponderação equilibrada entre o conforto térmico e a energia consumida e restringir os espaços ou zonas por níveis de conforto distintos. Uma das formas para fazer essa ponderação de uma forma equilibrada é o que figura 30 pretende ilustrar.

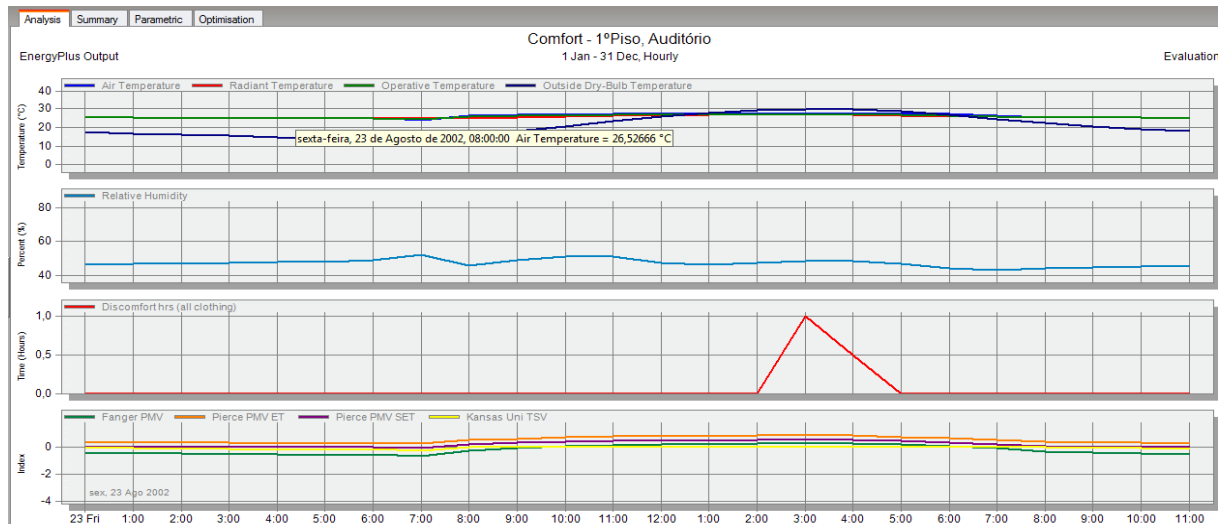


Figura 30 – Resultados obtidos pela simulação dinâmica na opção “Comfort” do software Design Builder, no dia 23 de Agosto, sexta-feira e com o sistema de AVAC em funcionamento para o espaço designado como “Auditório”.

Os níveis de conforto térmico, após a alteração das temperaturas interiores nos diferentes espaços, com o intuito de **maximizar a eficiência energética do sistema de AVAC otimizado**, podem ser visualizados na figura 30, sendo escolhido um dia da semana aleatoriamente e, que neste caso concreto, foi na estação de Verão e no dia 23 de Agosto, e como se pode visualizar através da mesma figura, verifica-se que é um dia bastante quente, atingindo a temperatura máxima exterior o valor de 30.5°C.

Conforme é perceptível na mesma figura, das 8h00m até as 14h00m e das 17h00m até 20h00m não existe desconto térmico, o que é perceptível ao visualizar-se o terceiro gráfico, em que a linha vermelha, corresponde ao número de horas de desconforto e para os intervalos atrás mencionados, a linha indica o valor zero. Situação diferente, é o ocorrido no intervalo de tempo entre as 14h00m e as 17h00m, existindo desconforto térmico, promovido pela existência de simultaneidade entre a hora da ocorrência do pico da temperatura exterior, às 15h00m, com o pico de desconforto térmico no interior do espaço, como era expectável, pelo que, os ocupantes vão sentir uma sensação de ligeiro calor, que pode ser comprovado na mesma figura, no último gráfico, ao analisarmos o índice de *Fanger*, valor este sensivelmente igual a 0.3 e que significa que os ocupantes poderão ter a sensação de ligeiro calor.

Neste caso, a **humidade relativa** continua em elevados parâmetros de qualidade, quase sempre com um valor constante e igual a 50%, pelo que, esta variável **não gera desconforto térmico** nos ocupantes, conforme é visível no 2º gráfico da figura 30.

Os resultados obtidos para o conforto térmico anteriormente, vêm sempre muito focados na temperatura e humidade relativa interior, conforme a norma ISO 7730 e o próprio *Design Builder*, que utiliza os pressupostos da norma ASHRAE 55 ou da ISO 7730.

No entanto, convém frisar que, existem outros parâmetros que influenciam o resultado destas 2 variáveis, tal como, a **temperatura operativa** (média entre a radiante e a interior), **radiante**,

velocidade do ar interior, resistência de vestuário, etc. O aumento na temperatura interior/operativa, não gerará um desconforto térmico nos ocupantes acima dos 10%, no entanto, ao pender a balança para o lado da energia, existe a forte hipótese de ocorrer em determinadas alturas do ano pequenos picos de desconforto térmico, principalmente nos períodos onde o clima é mais severo.

Normalmente na estação de arrefecimento, na maioria dos edifícios, ocorre a situação inversa ao caso otimizado, isto é, **a temperatura radiante das superfícies, é bem superior à temperatura do ar interior, incrementando o valor da temperatura operativa para níveis de grande desconforto térmico**, o que origina nos ocupantes, uma sensação de um “microclima” abafado, pelo que, poderemos ter **índices de conforto térmico mais elevados, com temperaturas interiores mais altas**, contribuindo este factor para uma **otimização dos consumos energéticos**, aliado a um conforto térmico de qualidade, conforme o que ocorre com o sistema AVAC otimizado.

12.2. ASHRAE 55

Antes de iniciar o presente capítulo, convém explicar o porquê da utilização da norma *ASHRAE 55* na análise do conforto térmico para o sistema VRF, quando foi utilizada anteriormente, a norma *ISO 7730* na análise de todos os sistemas de AVAC. A norma **ISO 7730**, na sua metodologia de cálculo, **fixa um valor para a humidade relativa**, valor este igual a **50%**, pelo que, a mesma fica excluída nesta análise, devido aos pressupostos de cálculo em que assenta, porque conforme é apresentado nos resultados do sistema VRF, esse valor para a humidade relativa interior não é conseguido na estação de arrefecimento, pelo que **a norma ASHRAE 55**, sendo mais flexível na análise dessa variável e permitindo variar o valor da mesma, **assume-se como a norma correcta e uma opção lógica**, para uma análise credível do conforto térmico para o sistema VRF.

12.2.1. Sistema VRF “Heat Pump”

Para uma plena abordagem ao projecto de sistemas de climatização, com base na manutenção do conforto térmico (por oposição à abordagem convencional que tem por objectivo a manutenção de uma temperatura do ar interior constante), o mesmo será analisado, no sentido de comparar quantitativamente e qualitativamente o sistema VRF face ao sistema de AVAC otimizado.

Recorrendo novamente ao DB, **mas desta vez não recorrendo ao software Analysis**, visto que este *software* tem por base a **ISO 7730**, para análise ao sistema VRF, utilizou-se a *ASHRAE 55* para quantificar o índice PPD. Na tabela 28 apresentam-se os resultados para a temperatura média radiante por estação para os diferentes espaços climatizados.

Tabela 28 - Temperaturas médias radiantes na estação de aquecimento e arrefecimento para o sistema VRF.

Espaço	Inverno (°C)	Verão (°C)
Auditório	18.0	24.8
Gabinete 1	17.9	25.2
Gabinete 2	18	25.1
Gabinete 3	17.5	24.4
Sala de Comando	17.8	24.5
Sala de Reuniões	17.8	25.2

Da análise da tabela 28 e relacionando com a tabela 26 pertencente ao capítulo 12.1.2 dedicado ao conforto térmico do caso otimizado, achei interessante colocar o gráfico 17 que permite de uma forma simples e rápida comparar os valores da temperatura radiante para os dois sistemas de climatização.

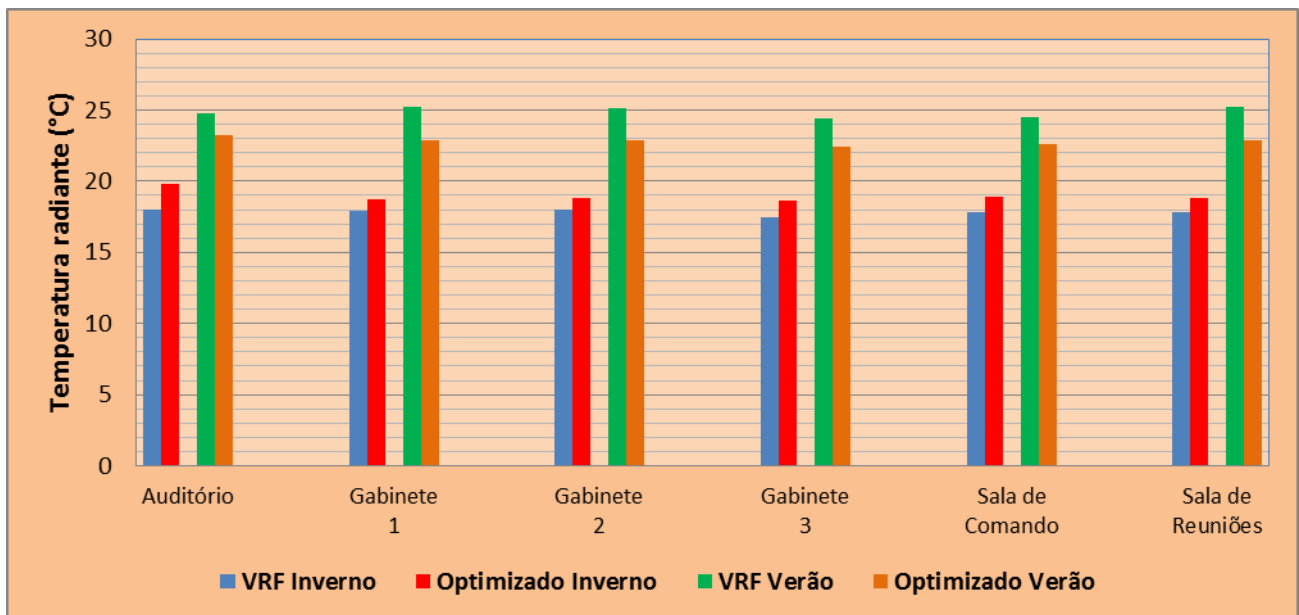


Gráfico 17 – Comparação da temperatura média radiante por estação e por sistema de climatização.

Para a obtenção/tentativa do mesmo grau qualitativo no conforto térmico no sistema VRF face ao caso otimizado e, analisando o gráfico 17, o mesmo permite antever que as temperaturas de insuflação do ar proveniente das unidades interiores do sistema VRF, terão que aumentar e diminuir na estação de aquecimento e arrefecimento respectivamente, em comparação directa com o sistema otimizado, pelo que, poder-se-á prever **um aumento no consumo energético do sistema VRF**, para as mesmas condições de conforto de térmico que o sistema otimizado oferece.

De referir que a norma *ASHRAE 55* assenta praticamente nos mesmos pressupostos da norma *ISO 7730*, no entanto, os dados de entrada são “trabalhados” numa forma diferente. Uma das condições, ou parâmetros de entrada diferentes entre as normas, é actividade metabólica e a resistência do vestuário no inverno, que na norma *ASHRAE* assumem o valor de 1,0 MET e 0,9 Clo respectivamente. Para igualar à análise realizada, segundo a norma *ISO 7730*, no sistema AVAC otimizado, estes valores no sistema VRF terão que ser modificados para 1,2 MET e 1 Clo, sendo

que por exemplo para outro nível de vestuário as temperatura-fronteira podem ser diminuídas em 0.6 K por cada 0,1 Clo de incremento, sendo que, de igual modo as temperaturas fronteiras podem ser diminuídas 1.4 K por cada MET de incremento acima de 1,2 MET. Os valores para as temperaturas operativas de acordo com a norma ASHRAE 55 encontram-se reportados na tabela 29.

Tabela 29 - Resultados obtidos para os diferentes espaços climatizados para a humidade relativa por estação através do DB e para a temperatura operativa de acordo com a norma ASHRAE 55 para o sistema VRF.

Espaço	Humidade relativa média Inverno (%)	Humidade relativa média Verão (%)	Temperatura operativa Inverno (°C)	Temperatura operativa Verão (°C)
Auditório	40.7	42.1	20.6	24.7
Gabinete 1	40.1	39.4	20.6	24.7
Gabinete 2	39.9	39.5	20.6	24.7
Gabinete 3	40.9	40.9	20.6	24.7
Sala de Comando	40.4	41.1	20.6	24.7
Sala de Reuniões	40.3	39.9	20.6	24.7

Para uma correcta análise ao conforto de acordo com a norma ASHRAE 55, foi necessário recorrer ao DB para obter o resultado da humidade relativa média mensal. Com os valores atrás apresentados, é possível obter a temperatura operativa para a estação de aquecimento e arrefecimento e com isso obter a temperatura de conforto interior. Para tal, foi considerado que a temperatura operativa é igual à média entre a temperatura radiante e a temperatura interior do ar. Os valores obtidos na tabela 29 referentes à temperatura operativa de Inverno e Verão **já se encontram corrigidas de acordo com um nível metabólico e resistência de vestuário igual ao analisado no caso optimizado**. Queria apenas referir, que os valores obtidos para as temperaturas operativas para o sistema VRF tiveram por base também a taxa de PPD definida no caso optimizado (não superior a 10%) para uma correcta e justa análise aos dois sistemas analisados, pelo que enquadrou-se esses valores na norma ASHRAE 55, conforme é ilustrado na figura 31, não se utilizando os extremos dos intervalos definidos pela norma devido a incorrer a uma taxa PPD superior a 10%.

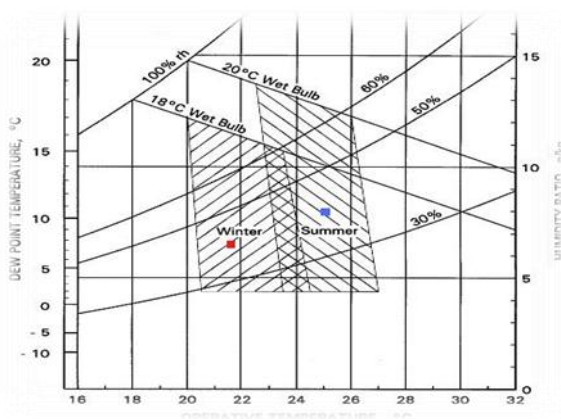


Figura 31 – Intervalo de valores recomendado pela norma ASHRAE para a temperatura operativa de acordo com humidade relativa. (Fonte: ASHRAE Fundamentals 2001, capítulo 8, figura 5).

De acordo com os valores resultantes da análise da norma *ASHRAE 55* calculou-se a temperatura do ar interior recomendado pela mesma, com os pressupostos atrás mencionados e resultados obtidos das tabelas 28 e 29 ao longo da presente análise. Na estação de aquecimento o valor da temperatura do ar interior calculado é igual a **23.3°C** e na estação de arrefecimento o valor é igual a **24.5°C**. Com as temperaturas do ar interior definidas, para a estação de aquecimento e arrefecimento, procedeu-se a uma nova simulação no DB, incluindo agora a análise do conforto térmico no sistema VRF. Os resultados são apresentados no gráfico 18.

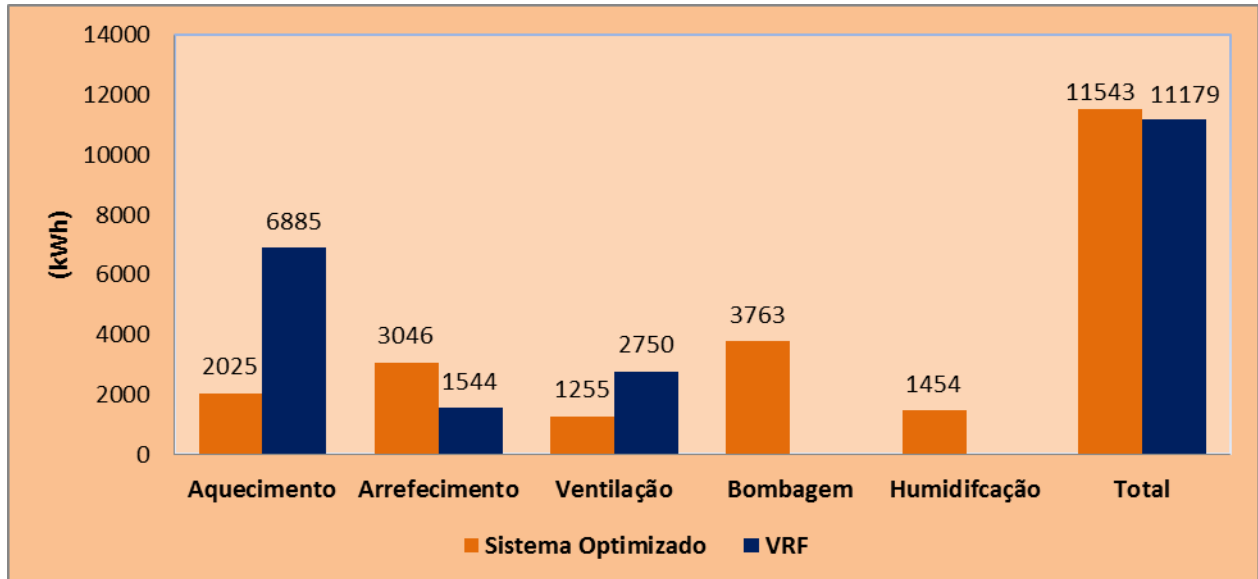


Gráfico 18 – Desagregação do consumo energético total do sistema de AVAC para o caso otimizado e VRF, afectado pela análise ao conforto térmico.

Conforme é perceptível no gráfico 18, na tentativa de igualar, o sistema VRF ao sistema otimizado ao nível do conforto térmico, assiste-se a **uma subida do consumo energético do sistema VRF**. O sistema otimizado, tem um comportamento energético notoriamente superior na estação de aquecimento, enquanto o sistema VRF na estação de arrefecimento supera o sistema otimizado a nível energético.

Na minha opinião este gráfico é de extrema importância, visto que, através do mesmo retira-se uma conclusão importante. O sistema **VRF**, mesmo com uma **“performance” energética inferior na estação de aquecimento** face ao sistema de climatização otimizado, continua a ser um sistema de extrema eficiência energética na sua globalidade, compensando um consumo superior no aquecimento, com a **ausência de consumo na bombagem e uma “performance” energética superior na estação de arrefecimento**.

No entanto, a ideia comum, que o **sistema VRF é mais eficiente que um sistema a água, é verdadeira, quando não se procede a uma análise ao conforto térmico**. Quando os dois são igualados em idênticas condições a nível do conforto térmico interior, o consumo energético do sistema VRF aumenta, e essa suposta eficiência energética muitas vezes vendida, esbate-se numa diferença de consumos energéticos para o sistema de AVAC otimizado, que no presente caso em estudo representa um acréscimo de 3.2%.

13. Viabilidade Económica

A análise de investimentos pode ser considerada como o conjunto de técnicas que permitem a comparação entre os resultados de tomada de decisões referentes a alternativas diferentes de forma científica.

Em qualquer estudo ou projecto em que se pretende analisar um conjunto de soluções possíveis, é inerente que seja efectuada a respectiva viabilidade económica de forma a ser possível chegar a uma solução otimizada, em que o rácio entre custo/benefício seja o mais rentabilizado possível. Conforme foi visto ao longo da presente tese, a alternativa que induz a consumos energéticos mais baixos no edifício/zona estudada, pode possuir um *pay-back* demasiado longo, não sendo a mesma rentável e aceitável, devido a razões explicadas de seguida, pelo que para validar uma opção escolhida, num leque de muitas possíveis, é obrigatória uma análise económica.

Um estudo de análise de investimentos deverá compreender e contabilizar as seguintes etapas: um investimento a ser realizado e quantificado; enumeração de alternativas viáveis; análise de cada alternativa; comparação das alternativas e por fim a escolha da melhor alternativa. A escolha da melhor alternativa na presente tese no estudo da envolvente teve por base e conforme foi referido anteriormente o rácio entre custo/benefício energético. Nos sistemas de climatização estudados a situação é um pouco diferente, ao ser incorporada na mesma uma análise ambiental.

Deve-se frisar, que os valores para o *pay-back* aceitáveis, diferem do que se está a analisar. Ao analisar a envolvente do edifício, terá que se ter em consideração a durabilidade do edifício, pelo que um *pay-back* de 20 ou mesmo 30 anos podem ser considerados aceitáveis. Já nos sistemas de AVAC, a situação é diferente, pelo que, *pay-back* da ordem de grandeza referidos anteriormente, não são aceitáveis. Não generalizando, mas tipicamente, um *pay back* aceitável numa instalação de climatização, tem um período de 5 anos, sendo que, conforme o montante do investimento e dos equipamentos utilizados, a duração do *pay-back* aceitável poderá aumentar dependendo de caso para caso.

13.1. Envolvente opaca e não opaca

O estudo térmico-energético realizado permitiu quantificar as necessidades energéticas do caso base abordado. Ao estudar os diferentes elementos que constituem a envolvente do edifício foi possível quantificar o benefício, ou neste caso, a redução energética que advinha das melhorias introduzidas e descritas ao longo da presente tese, transpondo-se de um caso base para um melhorado, no entanto será que quanto mais reduzimos no consumo energético do edifício com uma determinada alternativa/solução a mesma será a mais viável? Vejamos a tabela resumo seguinte.

Tabela 30 - Tabela resumo com a solução óptima por elemento construtivo com o menor pay-back.

Elemento da envolvente	Área (m ²)	Δ Envolvente (Materiais) – Caso base (€)	Δ Energia – Caso base (€)	Pay-back (anos)
Parede exterior [U=0.25 (W/m ² .°C)]	90	409.5	409.4	6.8
Cobertura [U=0.28 (W/m ² .°C)]	150	565.5	632.4	6.1
Pavimento [U=0.4 (W/m ² .°C)]	150	566.3	345.4	9.4
Vão envidraçado ([U=2.3 (W/m ² .°C)] e F.S=0.15)	58.8	2352	2083.4	6.5

Antes de comentar a tabela 30, convém abordar alguns pressupostos, no cálculo do *pay-back* dos elementos construtivos da envolvente do edifício. Para o estudo da viabilidade económica, foi considerado o preço unitário por kWh de 0,1326 €. No mesmo cálculo, também foi considerada uma taxa constante na variação do preço da energia eléctrica, igual a 4% por ano. Os resultados obtidos para o *pay-back* são em relação ao caso base, apresentado no capítulo 5 – “Caso em estudo”.

As soluções estudadas e adoptadas ao longo da tese face aos elementos constituintes da envolvente exterior do edifício, possuem um **pay-back médio ponderado de 7.4 anos**, conforme é apresentado na tabela 30, valor este que indica, que **as medidas correctivas são amortizadas num curto prazo de tempo**, se tivermos em conta **o ciclo de vida de um edifício**, que é projectado tipicamente para ter um ciclo de vida de aproximadamente **50 anos**.

13.2. Sistemas AVAC

Antes de comparar os diferentes sistemas de AVAC do ponto de vista económico, convém demonstrar os resultados que demonstram a não viabilidade económica do sistema *Green System*. Com o objectivo de resumir os resultados obtidos do *software* SolTerm, na tabela 31 apresenta-se a energia fornecida pelo sistema solar térmico para diferentes áreas de captação solares e respectiva fracção solar.

Tabela 31 - Resultados obtidos para sistema solar térmico/caldeira para diferentes áreas de captação solar.

Número de colectores	Área (m ²)	Energia Solar (kWh)	Energia Caldeira (kWh)	Fracção solar (%)
10	32.3	6622	15153	30.4
15	48.5	10371	11404	47.6
20	64.6	13522	8253	62.1
25	80.8	15528	6247	71.3
30	96.9	17283	4492	79.4
35	113.1	18609	3166	85.5
40	129.2	19337	2438	89

A relação entre a área de captação solar vs preço é apresentada na tabela 32, sendo que através desta se pode visualizar o custo real em utilizar energias renováveis face ao sistema optimizado que recorre a 100% a energia eléctrica. O investimento inicial do sistema optimizado apresentado é menor do que realmente é, devido ao facto nesta análise não ser necessário a bomba de calor, “substituída” pelo *chiller* de absorção.

Tabela 32 – Investimento inicial necessário para o sistema “*Green System*”.

Número de colectores	Investimento inicial Solar (€)	Investimento inicial caldeira (€)	Investimento inicial <i>chiller</i> de absorção (€)	Investimento sistema optimizado (sem bomba de calor) (€)	Total (€)
10	30685	Igual para todos e com o valor de 2300 (€)	Igual para todos e com o valor de 15000 (€)	Igual para todos e com o valor de 19350 (€)	67335
15	46075				82725
20	61370				98020
25	72720				109370
30	87210				123860
35	101790				138440
40	116280				152930

Tabela 33 – *Pay-back* para o sistema “*Green-System*” com diferentes possibilidades na área de colectores solares térmicos.

Número de colectores	Custo da energia térmica anual (€)	Investimento inicial (C.S vs Caldeira) (€)	<i>Pay-back</i> simples (anos)
0	1016	2300	-
10	727	69635	233
15	548	85025	177
20	396	100320	158
25	300	111670	153
30	215	126160	155
35	152	140740	160
40	117	155230	170

O preço do sistema solar térmico, e que no caso concreto, terá que ser capaz de elevar a temperatura da água para as requeridas pelo *chiller* de absorção, requerendo esta solução a adopção de **colectores de tubo de vácuo** que penalizam e encarecem em demasia o sistema solar

térmico, pelo que a solução com um **pay-back menor é a de 25 colectores**, representando uma fracção solar de 71.3%, no entanto, como seria de esperar, o número de anos necessário para **reaver o investimento inicial, face à solução da caldeira a pellets sem sistema solar térmico, é igual a 153 anos, valor este inaceitável**. A tabela 33 confirma que a estratégia para tornar este sistema teoricamente viável, será produzir a energia térmica necessária para o chiller de absorção, exclusivamente, com recurso à caldeira a *pellets*.

Para tornar o sistema produtor de energia térmica totalmente verde e, por esta solução não representar um **custo significativo ao mesmo**, será implementado ainda uma pequena central solar fotovoltaica, com o intuito de compensar os pequenos consumos eléctricos necessários para o funcionamento da caldeira a *pellets* e *chiller* de absorção. Na secção dos anexos, no subcapítulo intitulado de “Equipamentos” pode ser consultado a ficha técnica da central fotovoltaica e da caldeira, onde pode ser visualizado o consumo eléctrico da mesma que ronda o intervalo de 150 a 180 Wh.

Convém frisar que, a **caldeira a pellets** é um equipamento bastante competitivo, beneficiando também da vantagem de ser **um equipamento produtor de energia térmica amigo do ambiente, considerando que este completa o ciclo de carbono**.

Conforme o estudo anteriormente feito para a envolvente exterior do edifício, os diferentes tipos de sistemas de climatização estudados, também serão alvo de uma análise, com o objectivo de verificar e quantificar a sua viabilidade económica. Os sistemas analisados são o **caso base com a envolvente optimizada, o sistema optimizado, o VRF e o “Green-System”** com e sem o sistema solar térmico. A análise da viabilidade económica dos diferentes sistemas de AVAC, será ligeiramente diferente à que se fez no caso da envolvente exterior do edifício. Nesta parte, os sistemas não serão comparados face ao sistema base, **mas sim entre si**, sendo feito também, **uma análise às emissões de CO₂** emitidas por cada sistema para a atmosfera. **O nível de segurança** de cada sistema AVAC também é analisado, indicando a **quantidade de fluido frigorigéneo em cada sistema**, indicando a quantidade em contacto com os utilizadores **directamente e indirectamente**. No estudo da viabilidade económica efectuado para os sistemas de AVAC, é incorporada a parcela correspondente ao preço que cada um terá relativamente á **manutenção necessária**, sendo esta componente chamada de **“Custo de exploração do sistema”**, sendo que, esta componente é de extrema importância, devendo ser sempre contabilizada no estudo da viabilidade económica de um sistema de AVAC, pois um sistema que tem um investimento inicial mais baixo, não significará que seja o mais competitivo e rentável ao fim do seu ciclo de vida, visto que, pode ter um custo de manutenção ou exploração anual mais caro, pelo que no fim de contas, o mesmo poderá não compensar o menor investimento inicial realizado.

Os pressupostos no cálculo da viabilidade económica, tais como a variação do preço da energia eléctrica por exemplo, para os sistemas de AVAC serão os mesmos utilizados quando se procedeu à análise económica da envolvente exterior do edifício.

A tabela 34 é uma síntese dos cálculos necessários para proceder ao estudo da viabilidade económica dos diferentes sistemas de AVAC e pretende apresentar uma comparação global de todos os *items* atrás propostos.

Tabela 34 – Viabilidade económica dos diferentes sistemas de climatizados estudados.

Sistema	Custos	Pay-Back	Análise Ambiental / Segurança sistema / Conf. térmico
Base			
Equipamento Energético: Bomba de Calor	Custo AYAC: 1995 euros; 1331 euros/m ² Consumo energético anual: 16181 kWh/ano; 107,9 kWh/m ² /ano	Diferença de custo de investimento: +4000 euros	Segurança: Sistema indireto (veículo); 81 kg de gás
Tratamento do ar: Convectivo forçado (UTAs e VC's)	Emissões de CO2 equivalente: 5631 kg; 37,6 kg/m²	Diferença de custo de amortização: 210 euros	Classificação conforto térmico: 4 (Bom)
Solução de ventilação criando ligeira sobrepresão nos espaços	Emissões de CO2 equivalente durante o ciclo de vida (10 anos): 56,3 ton Custo anual de amortização: 510 euros; 3,4 euros/m ²	Diferença de custo na energia consumida no 1º ano: -597,3 euros	Emissões de CO2: -26,5% Significa retirar 1,6 carros de circulação por ano, para um percurso diário de 30 km.
Optimizado			
Equipamento Energético: Bomba de Calor	Custo AYAC: 2470 euros; 165 euros/m ² Consumo energético anual: 11931 kWh/ano; 79,4 kWh/m ² /ano	Optimizado vs Base Diferença de custo de investimento: +4900 euros	Segurança: Sistema indireto (veículo); 7,7 kg de gás
Tratamento do ar: Radante	Emissões de CO2 equivalente: 4140 kg; 27,6 kg/m²	Diferença de custo de amortização: -160 euros	Classificação conforto térmico: 5 (Excelente)
Solução de ventilação criando ligeira sobrepresão nos espaços	Emissões de CO2 equivalente durante o ciclo de vida (10 anos): 41,4 ton Custo anual de amortização: 300 euros; 2 euros/m ²	Diferença de custo na energia consumida no 1º ano: -98 euros	Emissões de CO2: 0,06%
YRF			
Equipamento Energético: YRF (Módulo Bomba de calor)	Custo AYAC: 1970 euros; 137 euros/m ² Consumo energético anual: 11179 kWh/ano; 74,5 kWh/m ² /ano	YRF vs Base Diferença de custo de investimento: -100 euros	Segurança: Sistema direto (veículo); 6 kg de gás na instalação + 11 kg na unidade exterior
Tratamento do ar: Convectivo forçado (unidades interiores)	Emissões de CO2 equivalente: 3890 kg; 25,9 kg/m²	Diferença de custo de amortização: +160 euros	Classificação conforto térmico: 3 (Satisfatório)
Solução de ventilação criando ligeira sobrepresão nos espaços	Emissões de CO2 equivalente durante o ciclo de vida (10 anos): 38,9 ton Custo anual de amortização: 450 euros; 3 euros/m ²	Diferença de custo na energia consumida no 1º ano: -683,3 euros	Emissões de CO2: -30,3% Significa retirar 1,9 carros de circulação por ano, para um percurso diário de 30 km.
Green-System™ sem colectores solares térmicos			
Equipamento Energético: HF à tubaria + Cdd; 4 pellets + Chiller de abs. + F	Custo AYAC: 3060 euros; 203 euros/m ² Consumo energético anual: 6093 kWh/ano; 40,1 kWh/m ² /ano	Green-System vs YRF™ Diferença de custo de investimento: -1820 euros	Segurança: Sistema indireto (veículo) (fluido refrigerante)
Tratamento do ar: Radante	Emissões de CO2 equivalente: 2090 kg; 13,9 kg/m²	Diferença de custo de amortização: -80 euros	Classificação conforto térmico: 5 (Excelente)
Solução de ventilação criando ligeira sobrepresão nos espaços	Emissões de CO2 equivalente durante o ciclo de vida (10 anos): 20,9 ton Custo anual de amortização: 370 euros; 2,5 euros/m ²	Diferença de custo na energia consumida no 1º ano: +404,9 euros	Emissões de CO2: -48,3% Significa retirar 1,9 carros de circulação por ano, para um percurso diário de 30 km.
Green-System™ com colectores solares térmicos			
Equipamento Energético: HF à tubaria + Cdd; 4 pellets + Chiller de abs. + F	Custo AYAC: 11942 euros; 793,6 euros/m ² Consumo energético anual: 6093 kWh/ano; 40,1 kWh/m ² /ano	Green-System vs Base* Diferença de custo de investimento: -1820 euros	Segurança: Sistema indireto (veículo) (fluido refrigerante)
Tratamento do ar: Radante	Emissões de CO2 equivalente: 2090 kg; 13,9 kg/m²	Nota: Não se justifica fazer uma viabilidade a este sistema Se aparece nesta tabela, para evidenciar a redução no número de emissões de CO2 para o sistema base	Classificação conforto térmico: 5 (Excelente)
Solução de ventilação criando ligeira sobrepresão nos espaços	Emissões de CO2 equivalente durante o ciclo de vida (10 anos): 20,9 ton Custo anual de amortização: 510 euros; 3,3 euros/m ²		Emissões de CO2: -62,3% Significa retirar 3,8 carros de circulação por ano, para um percurso diário de 30 km.

Nos sistemas de climatização e analisando a tabela 34, verifica-se que o sistema **com o índice de rentabilidade mais elevado ou com um *pay-back* menor é o sistema VRF**, sendo um sistema com custos iniciais um pouco mais elevados que o sistema base, no entanto, o período de retorno de investimento face ao mesmo é imediato. Em relação aos restantes sistemas de climatização, o sistema VRF é um sistema que requer menos investimento inicial, apresentando um custo maior de exploração face aos restantes, no entanto a redução no consumo energético face aos outros compensa um custo de exploração associado ao mesmo mais elevado, pelo que ao adoptar as outras soluções de climatização estudadas na presente tese, **terá que existir a consciência que a diferença no capital investido nunca será recuperada**. Relativamente ao que foi dito anteriormente, chegamos à conclusão que o sistema VRF do ponto de vista económico é o sistema mais atractivo, sendo o que possui o custo investimento inicial mais baixo e o que origina a maior redução no consumo energético dos vários sistemas de AVAC, no entanto **os sistemas de climatização têm que ter uma análise mais cuidada e abrangente**, pelo que outros campos de escolha/decisão serão analisados.

No capítulo da segurança, o sistema VRF é o único dos sistemas de AVAC estudados na presente tese que utiliza um fluido refrigerante na totalidade da sua instalação, enquanto o sistema base e optimizado vêem circunscrito o raio de acção do mesmo apenas às suas unidades produtoras de energia térmica. **O sistema “Green-System” é o único dos sistemas a não utilizar fluido refrigerante em toda a sua instalação**, sendo o mesmo substituído por uma mistura aquosa de brometo lítio e água na unidade produtora de água gelada. Os sistemas estudados podem ser englobados nos seguintes grupos de acordo com a norma **NP EN 378 – Sistemas frigoríficos e bombas de calor: Segurança e requisitos ambientais**, sendo que a mesma não é aplicável a sistemas frigoríficos que utilizem ar ou água como fluido frigorífero, que no presente caso em estudo são todos os sistemas à excepção do sistema VRF, pelo que a presente norma é aplicável apenas ao mesmo.

- Sistema directo (fechados) – VRF;
- Sistemas indirectos – Sistema base melhorado e optimizado.

O sistema “Green-System” não é englobado nos grupos anteriores por não utilizar fluido frigorífero.

De uma forma resumida, a norma NP EN 378 aplica-se a sistemas novos e já existentes nas partes relativas à manutenção, à reparação, ao funcionamento e à recuperação, reutilização e entrega de fluidos. Nas restantes acções a norma aplica-se apenas aos novos sistemas e a remodelações e ampliações de sistemas existentes (L.Roriz).

A parte 1 da norma apresenta extensa terminologia, classifica os fluidos frigoríferos em termos de saúde e segurança em 3 grupos e classifica as zonas de ocupação em três categorias, em função da segurança para as pessoas face ao risco de acidente com a instalação. Em face destas classificações, indica o procedimento a seguir na escolha do sistema de arrefecimento ou aquecimento e do fluido frigorífero. (L.Roriz)

Fazendo uma breve análise ao que foi dito anteriormente constata-se **que o sistema “teoricamente” mais problemático no capítulo da segurança é o sistema VRF**, pelo que ao comparar com os restantes sistemas poderemos dizer que ao atribuir-se uma classificação aos

sistemas, o sistema VRF é o que apresenta a classificação mais baixa neste capítulo. A título de curiosidade e conforme poderá ser consultado na tabela 34, a quantidade de fluido frigorigéneo em contacto directo com os ocupantes no sistema VRF, é igual a 6 kg.

No capítulo do conforto térmico e conforme foi analisado na presente tese, o sistema AVAC base com a envolvente optimizada apresenta como “defeito” o método como transfere o calor no interior dos espaços, de igual modo ao sistema VRF, sendo ambos por convecção forçada. O sistema optimizado e o “*Green-System*” apresentam a vantagem de climatizar os espaços pelo método radiativo. Apesar das melhorias introduzidas no sistema VRF, no que concerne num maior “controlo” do valor da humidade relativa interior, o mesmo não apresenta os índices de conforto térmico que o sistema optimizado atinge, pelo que na minha opinião **o sistema optimizado e o “*Green-System*” têm comportamentos superiores face ao sistema VRF nesta temática, pelo que devem ser valorizados por esta mais-valia, apesar dos custos de investimento iniciais mais elevados em comparação com o sistema VRF.**

Relativamente **ao número de emissões de CO₂** enviadas para a atmosfera e analisando novamente a tabela 34, verifica-se que o sistema de AVAC **menos poluidor é o “*Green-System*”**, seguindo em segundo lugar o sistema VRF e o sistema optimizado, sendo que existe uma ligeira vantagem para o VRF, no entanto pode-se dizer que existe um empate técnico entre ambos. O sistema **mais poluidor dos estudados é o sistema base com a envolvente optimizada.**

Comparando numericamente os sistemas, os números são impressionantes, se reflectirmos na área climatizada e se transpusermos estes resultados para um edifício considerado, por exemplo de grande edifício de serviços ($A_{\text{útil}} > 1000 \text{ m}^2$), esta área representa cerca de 6.7 vezes a área útil do edifício em estudo, pelo que os resultados obtidos no caso em estudo poderiam seguramente ser multiplicado várias vezes, pelo que o impacto nesse caso seria substancialmente maior. Para se ter uma noção, **a diferença percentual ou a redução do número de emissões do sistema de climatização “*Green-System*” para o sistema base com a envolvente optimizada é de cerca de 63%**, correspondendo ao fim do ciclo de vida dos sistemas (considerado igual a 15 anos) de **53,1 toneladas de CO₂ não enviadas para atmosfera**, isto claro, na adopção do sistema “*Green-System*”, o que equivale a dizer que **conseguia-se retirar das estradas 4 carros durante 15 anos**, considerando para o cálculo um valor nas emissões de CO₂ de 120 g/km e que o mesmo percorre uma distância de 30 km por dia útil.

Depois de uma análise a diferentes pontos que deve sempre existir para quantificar vantagens/desvantagens nos diferentes tipos de sistemas de AVAC existentes, **no presente caso em estudo será incorrecto indicar que um sistema é superior a outro em termos absolutos.** No entanto e conforme os resultados obtidos e sumarizados duas de várias questões podem ser colocadas, **um custo de investimento inicial maior para garantir um índice de conforto térmico elevado compensará a não viabilidade económica do sistema optimizado face ao sistema VRF para a tipologia do edifício em estudo? Actualmente a análise ambiental de um sistema de AVAC será tão importante assim, quando os factores económicos (e não energéticos) aparecem em primeiro lugar?** As respostas para estas duas perguntas são deixadas ao critério de cada leitor, pois com certeza irão suscitar várias respostas e diferentes opiniões.

14. Conclusões

Em relação aos elementos constituintes da envolvente opaca e não opaca do edifício em estudo a conclusão principal que se pode extrair é que potenciando a diminuição do coeficiente de transmissão térmica (na envolvente opaca com o aumento da espessura de isolamento e na adopção de vidros com tratamentos térmicos e químicos especiais) o **consumo energético do mesmo é reduzido em cerca de 11%**, sendo que simulando elemento a elemento separadamente o resultado difere para 18%. Contudo nem sempre um aumento da espessura do isolamento térmico conduz a maiores reduções energéticas pelo que **uma análise económica é obrigatória** para auferir qual a espessura óptima de isolamento térmico, rentabilizando o factor energético com o económico. **Outra conclusão importante** que se pode retirar nos resultados obtidos é que compensa em muito isolar devidamente o edifício em estudo, **sendo que as soluções apresentadas obtiveram um *pay-back* médio de 7,4 anos**, valor este excelente se analisarmos o ciclo de vida do mesmo, que tradicionalmente é projectado para uma durabilidade nunca inferior a 50 anos.

Potenciando um aumento da espessura de isolamento térmico e colocando o mesmo pelo lado exterior da envolvente, assistiu-se também a **um aumento da inércia térmica interior do edifício** em estudo, que inicialmente por si só já era forte. **Neste caso em estudo**, este aumento da inércia térmica potenciou uma série de vantagens que foram decisivas mais adiante no estudo dos diferentes tipos de sistemas de AVAC analisados, devendo-se realçar na minha opinião duas das várias vantagens que este aumento proporcionou. Uma delas foi **a auto-regulação da temperatura interior** na fracção climatizada, sendo desnecessário por exemplo a inclusão de *“free-cooling”* nocturno na estação de arrefecimento, medida esta que à primeira vista parecia ter um potencial enorme a ser explorado, no entanto a simulação dinâmica mostrou que nesta época a temperatura interior nos espaços climatizado mesmo no período de não funcionamento do sistema de climatização a temperatura interior de conforto era praticamente mantida, não existindo grandes oscilações térmicas no edifício durante todo o ano. **A outra vantagem** de

aumentar a inércia térmica do edifício **foi o aumento da temperatura radiante das superfícies**, obtendo-se assim temperaturas operativas mais elevadas e **sendo possível climatizar os diferentes espaços com o mesmo grau de conforto térmico com temperaturas de insuflação do ar mais baixas**, permitindo uma maior eficiência energética do sistema e por conseguinte **uma redução no consumo energético em cerca de 13%** e na sua pegada ecológica contribuindo com menos emissões de CO₂ para a atmosfera. Deve-se referir que **a grande desvantagem** do aumento da inércia térmica interior tem por base a **sustentabilidade**, visto que os materiais constituintes de uma envolvente com classe de inércia térmica forte **contêm mais energia incorporada** na sua produção e conseqüentemente mais toneladas de CO₂ serão enviadas para a atmosfera.

Nos sistemas de climatização estudados na presente tese, o **sistema base com a envolvente otimizada**, adveio das várias medidas correctivas introduzidas na envolvente exterior do edifício, sustentado com o estudo térmico/energético realizado. Por sua vez, e no seguimento da análise que se procedeu na envolvente exterior do edifício, surgiu o **sistema otimizado**, em que se introduziu várias medidas correctivas no sistema de climatização base, **objectivando a eficiência energética**. Como sistemas alternativos aos sistemas anteriormente estudados, foram propostos e estudados, o sistema VRF e o “*Green-System*”, tendo este último sistema, o objectivo principal de utilizar energias alternativas e de reduzir o número de emissões de CO₂ para a atmosfera.

Nos sistemas de climatização estudados a escolha do sistema “ideal” depende de alguns pressupostos e do critério de quem está a avaliar os mesmos, no entanto existem dois sistemas que se destacam pela redução nos consumos energéticos e respectiva viabilidade económica face ao caso base com a envolvente otimizada, são eles o **sistema otimizado e o sistema VRF**, conseguindo-se **reduções energéticas de 26.5 e 31%** respectivamente, face ao caso base otimizado e de **35.9 e 39.8%** face ao caso base.

Os dois sistemas foram estudados e comparados ao longo da presente tese, mas concluir que um sistema é melhor que o outro é errado, existem, isso sim, algumas vantagens e desvantagens de um relativamente ao outro.

O sistema de climatização otimizado face ao sistema VRF possui a vantagem no que diz respeito ao conforto térmico, permitindo ter um conforto de excelência com praticamente o mesmo consumo energético que um sistema VRF. **A centralização do equipamento distribuidor de energia térmica**, passando de **VAC para VAV** e dotando a mesma com **recuperação de calor** foram essenciais para baixar os consumos no sistema otimizado, contribuindo também o sistema de baixa entalpia para o tratamento do ar ambiente, o sistema radiante em todo ano contribui muito para este facto ao contrário permitindo baixar a potencia necessária na estação de arrefecimento da bomba de calor, permitindo reduzir os consumos energéticos anuais permitindo o uso de temperaturas para a água quente/fria mais baixa e alta respectivamente, do que acontece nos restantes sistemas (excepto “*Green-System*”) que utilizam a convecção forçada como meio de transferência de calor no interior dos espaços. A grande vantagem do sistema VRF é o menor tempo de resposta necessário no arranque da instalação, principalmente na estação de aquecimento, prevenindo o mesmo de fenómenos que ocorrem com alguma regularidade em sistema a água, como é o caso dos “*Warmups*”. Outra vantagem evidente é o facto do mesmo não possuir electrobombas para a movimentação do fluido responsável pela transferência de calor.

Analisando os resultados obtidos para o **sistema VRF, deve-se realçar** a sua notória viabilidade económica, sendo teoricamente o sistema de climatização de todos os analisados na presente tese, aquele que apresenta **uma performance económica mais elevada**. Contudo o sistema VRF possui alguns problemas, como o facto de recorrer ao uso de fluidos refrigerantes em toda a sua rede de tubagem, o que pode levantar questões de ordem de segurança para os mais conservadores e cépticos. Outra conclusão importante que se retira dos resultados obtidos no DB do sistema VRF e evidenciada na presente dissertação, é o pouco controlo que este tem numa das componentes chave que definem o conforto térmico, a humidade relativa interior, pelo que apesar de este ser o sistema mais eficiente a nível energético, **o mesmo nunca se poderá comparar com o otimizado a nível de conforto térmico**.

O **“Green-System”** é um sistema **“outsider”** face aos outros dois mencionados **devido à sua análise económica** que compromete em muito o mesmo, no entanto, tal sistema deve ser destacado pela grande redução nos consumos energéticos primários de origem não renovável que este promove. No entanto, o investimento necessário para a produção de energia térmica recorrendo a energia solar ou à queima de *pellets* é muito superior face aos outros sistemas. Este sistema também sai penalizado por mais dois motivos: o primeiro é com o custo inerente à utilização de tecnologias ainda com pouca expressão no mercado português; o outro prende-se com o facto de o sistema de produção de água quente para alimentar o *chiller* de absorção ter um período específico de utilização, operando apenas na estação de arrefecimento, já que em aquecimento temos disponibilizada água à temperatura desejada, vinda do sistema de refrigeração da turbina. **A grande virtude deste sistema de AVAC, baptizado nesta tese de “Green System”** é a sua componente ambiental, **reduzindo em cerca de 72.1%** face ao sistema base. Uma das conclusões que se pode retirar na análise ao sistema “verde” é que o mesmo poderá ser competitivo num futuro próximo, estando apenas comprometido a nível económico.

O importante do que foi referido no parágrafo anterior, é que, é necessário criar-se condições favoráveis para o uso das energias renováveis, sustentando e fomentando o seu desenvolvimento e prática, no entanto convém frisar, que estas como não tem um comportamento constante durante o ano, poderão não ser suficientes em determinados períodos do mesmo, no entanto, o que convém salientar e potenciar é que toda a energia conseguida através dela é um “bónus” que a natureza nos oferece, contribuindo para minimizar o uso de energia com fonte em combustíveis fósseis para as situações em que o uso das energias limpas não consiga satisfazer as necessidades globais dos sistemas de climatização ou de outros, ao mesmo tempo que reduzimos as emissões de gases que provocam o efeito de estufa. Incentivos fiscais são necessários para promover o uso das energias renováveis e diminuir o *“pay-back”* da instalação, de forma a tornar o uso das mesmas mais aliciantes.

Uma das conclusões que se pode retirar sobre esta dissertação é que um estudo térmico-energético deve ser sempre acompanhado de uma simulação dinâmica detalhada, sendo esta uma ferramenta vital, permitindo identificar os pontos fracos de um edifício e permitindo também potenciar os fortes, contudo para efeitos de certificação energética a utilização de diferentes *softwares* e metodologias diferentes de cálculo das cargas térmicas podem originar diferentes classificações energéticas para o mesmo edifício.

15. Perspectivas de trabalhos futuros

Como sugestão para trabalhos futuros gostaria de apontar os seguintes *items* a nível dos sistemas de climatização:

- **Avaliar o desempenho de um sistema de climatização VRF com condensação a água e comparar com o seu homólogo a condensação a ar, no sentido de averiguar a possível redução nos consumos energéticos. Seria também interessante quantificar o verdadeiro impacto do mesmo, pois ao contrário do que acontece no VRF com condensação a ar, neste novo sistema teríamos uma nova parcela no consumo energético, a bombagem de água desde a unidade exterior até à torre de arrefecimento, quantificando **se as possíveis reduções energéticas na produção de energia térmica seriam suficientes para compensar a nova parcela e consequentemente aumento no consumo energético no transporte de água**, acompanhada de uma verificação à sua viabilidade económica, **visto este sistema ser mais dispendioso e acarretar um custo de investimento inicial mais elevado.****
- Estudar a viabilidade de **produção de água gelada e respectiva armazenagem em bancos de gelo.**

A nível do *software* de simulação dinâmica é sugerido o seguinte item:

- À semelhança da comparação sumária que foi efectuada entre os dois softwares de simulação dinâmica (**Trace 700 e DesignBuilder**) e depois no TRACE 700, em que se analisou os desvios ocorridos para um mesmo modelo em que se diferiu nas metodologias no cálculo das cargas térmicas, seria interessante proceder de igual modo, mas agora no DB, **para auferir os desvios percentuais que podem existir entre os vários modelos de simulação disponíveis no mesmo, a simulação dinâmica em *Simple, Compact e Detailed mode*.**

A nível do estudo da envolvente do edifício e inerentemente aos sistemas de climatização são sugeridos os seguintes *items*:

- Realizar um estudo ao caso analisado em que o objectivo essencial passaria pela **possível eliminação dos sistemas de AVAC**, promovendo, potenciando e estudando uma maior interacção da **arquitectura bioclimática** no edifício, combinando soluções que fossem ao encontro da **maximização da ventilação natural nos espaços**, combinado com um sistema passivo de introdução de ar novo na fracção climatizada, onde a introdução do ar por condutas enterradas poderia ser uma hipótese, aproveitando a temperatura constante que o solo tem durante todo o ano. No caso de não ser possível atingir temperaturas de insuflação do ar satisfatórias, para os diferentes espaços a climatizar, a combinação com sistemas de AVAC poderia ser uma hipótese, reagrupando num **sistema híbrido**, em que o objectivo principal passaria por tirar proveito do clima onde o edifício está inserido, em que tradicionalmente os Verões são quentes e secos, factor este climático e que pode potenciar a utilização de uma **roda dissecante** para proceder ao arrefecimento dos espaços com requisitos térmicos, promovendo até uma comparação energética, como se fez na presente tese, com a hipótese de climatizar o edifício por exemplo, com **arrefecimento evaporativo**. Comparar o **sistema híbrido atrás sugerido**, do ponto de vista **energético, económico e do conforto térmico, com os sistemas de climatização analisados na presente tese, seria deveras aliciante e interessante**.
- Analisar diferentes hipóteses de sombreamento aos envidraçados que permitam realizar um sombreamento ajustado ao edifício hora a hora (alhetas de orientação auto-reguláveis) e, assim, otimizar os ganhos solares durante todo o ano, maximizando os mesmos na estação de aquecimento e minimizando na de arrefecimento.

16. Considerações finais

Em primeiro lugar gostaria de enaltecer o “gozo” que me deu realizar a presente tese, contudo gostaria de referir, que uma das grandes vantagens na realização da mesma, foi o contacto com um *software* recente e desconhecido para mim, o **DesignBuilder**, estando mais familiarizado com outros *softwares* da área como o TRACE 700 ou o Hap-Carrier.

Queria apenas referir que para chegar aos resultados obtidos e erros detectados, foi necessário proceder a ajustes nos próprios sistemas de AVAC, ajustes nos “*set-point's*” pretendidos, verificar as temperaturas/humidades relativas nos diferentes espaços, entre muitos outros factores, pelo que foi necessário **efectuar dezenas de simulações**, devendo-se frisar o papel de uma das ferramentas mais importantes existentes no DB e, que pode ser considerada exclusiva do *software*, o “**HVAC Detailed**”, permitindo este “moldar” praticamente qualquer sistema de climatização, no entanto, sendo um *software* recente, tem algumas limitações, que foram colocadas nos Anexos da presente tese em determinados tipos de sistemas de AVAC, contudo deve-se realçar que o mesmo está em constante actualização, devendo-se reconhecer e na minha opinião que o mesmo possui a melhor informação e apoio técnico, sendo o site na internet do DB muito bem estruturado permitindo a interacção com os elementos da equipa técnica do mesmo e utilizadores do *software* no esclarecimento de dúvidas.

Quero apenas tecer uma breve consideração ao sistema VRF que considero importante. Conforme é referido no subcapítulo 11.4.1, o *software Design Builder* ainda não permite simular o sistema VRF com condensação a ar na sua plenitude, contudo, o mesmo estará disponível na versão 8 do *Energy Plus* disponível no fim do ano 2012, pelo que foi abandonada a hipótese de simular o mesmo sistema com **condensação a água por questões técnicas aliadas ao *software***.

Convém frisar que os resultados obtidos para o sistema VRF, apesar de se poder considerar resultados bastante satisfatórios, no que concerne aos consumos energéticos do mesmo, este sai penalizado ao não se realizar a simulação dinâmica do mesmo com condensação a água, pois o

sistema que foi simulado fica muito dependente das condições exteriores, num clima propício a Invernos rigorosos e a Verões quentes e secos, prejudicando em muito a eficiência do mesmo, ao invés do que poderia acontecer com o sistema VRF com condensação a água, onde as temperaturas disponíveis para a água de condensação são praticamente constantes todo o ano, beneficiando o mesmo ao nível de eficiência energética, **acentuando ainda mais a ideia que este sistema demonstra que é uma forte alternativa a qualquer sistema de climatização**, pairando também a forte ideia (na minha opinião uma certeza) que os valores obtidos no consumo energético referentes ao sistema VRF poderiam ainda ser mais baixos, **acentuando ainda mais a diferença de consumo energético face aos sistemas de AVAC analisados na presente tese.**

Visto que análise térmica/energética de um edifício é um trabalho moroso e em que existem muitos factores que podem condicionar os resultados finais da mesma, queria apenas abordar um factor que não foi analisado na presente tese, devido à não aplicabilidade na tipologia do edifício em estudo, pelo que, por esse motivo e por mútuo acordo entre mim e a minha orientadora, não se enquadrar no âmbito da presente tese, factor este que é o **estudo da iluminação natural e controlo da iluminação artificial.**

Conforme é ilustrado no capítulo 7, **a iluminação artificial corresponde praticamente a metade dos consumos energéticos do edifício, aumentando este valor ao longo da presente tese, com a constante optimização do sistema de climatização base estudado, conforme é ilustrado no gráfico 19.**

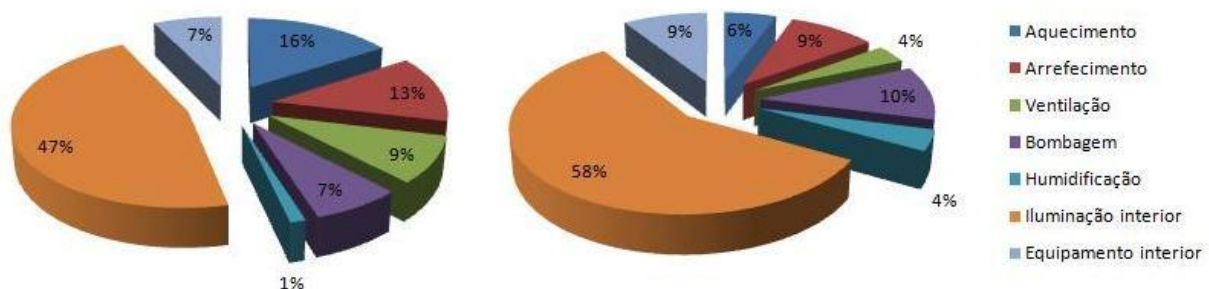


Gráfico 19.1 e 19.2 – Comparação e distribuição em pesos percentuais do consumo energético do edifício no sistema base (à esquerda) e o sistema optimizado.

No entanto, os pesos percentuais atrás indicados podem mudar, se tivermos em conta que a fachada orientada a Sul possui uma área de vãos envidraçados considerável, pelo que, uma análise à possível iluminação natural que poderá advir do exterior, através dos envidraçados nos espaços deve ser realizada, de maneira a ser possível quantificar a diminuição (ou não) da iluminação artificial necessária nos diferentes espaços. Basicamente, a ideia e pensando de uma forma análoga a um sistema térmico que recorre por exemplo a painéis solares térmicos com auxílio a uma caldeira para produção de energia térmica, é utilizar a iluminação artificial como apoio/auxiliar (caldeira) e não como principal meio de iluminação nos espaços, com uma utilização mais restrita e com o objectivo de compensar áreas ou zonas, onde através da iluminação natural não conseguimos iluminar os espaços em causa com a intensidade luminosa requerida.

Para estudar o efeito da iluminação natural conjugada com um controlo da iluminação artificial escolheu-se um vidro duplo que cumprisse com o factor solar máximo admissível pelo RCCTE, no entanto optou-se por utilizar um vidro que possuísse uma elevada taxa de transmissibilidade da luz solar, para maximizar e **potenciar o efeito “Daylight”**. A par da utilização do vidro anterior, também foi simulado outras tipologias de vidro, todos pertencentes ao vidro que obteve o melhor resultado no estudo do sistema de AVAC, os low-e, no entanto com factor solares mais elevados de forma a potenciar a iluminação natural. Aliado a este estudo, é também utilizado um controlo da iluminação artificial, dependendo a utilização da mesma, da intensidade luminosa fornecida pela iluminação natural. Mais uma vez foi utilizado o software *DesignBuilder*, no módulo “Daylight”, para o estudo da iluminação natural. A nível do controlo da iluminação deve-se frisar que o programa permite simular três controlos diferentes, o “stepped”, o “linear” e o “linear off”. Resumidamente, o controlo “stepped” permite alternar a iluminação artificial num comando *ON/OFF*, de acordo com a disponibilidade de luz natural em passos/”steps” discretos. Considerando que o controlo contínuo, descrito anteriormente, fornece iluminação controlada com precisão, isto permite escurecer as luzes de acordo com o modelo definido de controlo por degraus/blocos das luminarias, permitindo a activação desse controlo através de um sensor que modela de acordo com a exigência de iluminação eléctrica requerida para o espaço. O esquema e o número de blocos/passos que o *software* define é o que se pode visualizar na figura 32.

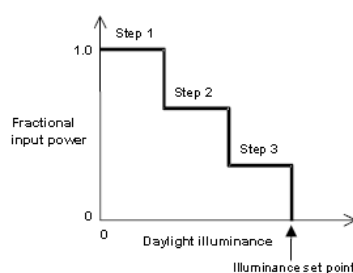


Figura 32 - Controlo da iluminação artificial interior com comando por degraus ou “steps” – [Fonte: (http://www.designbuilder.co.uk/programhelp/lighting_control.htm)].

Tabela 35 - Percentagem de luzes activadas de acordo com o controlo imposto relativamente à intensidade luminosa fornecida pela iluminação natural.

Iluminação natural (lux)	Percentagem de luzes activadas (%)
0-200	100
200-400	66.6
400-600	33.3
>600	0

Com o comando “linear” as luzes vão linearmente reduzir/aumentar a sua potência eléctrica, de acordo com a intensidade luminosa fornecida através da iluminação natural, no entanto, a potência eléctrica das mesmas nunca é igual a zero, pelo que, com este comando as luzes nunca se desligam totalmente, tendo sempre presente um *output* mínimo de potência eléctrica consumida com condições favoráveis para a iluminação natural. O comando “linear off” diverge do anterior, com a excepção de quando o mínimo de escurecimento é alcançado, isto é, quando o efeito “Daylight” é máximo, as luzes desligam por completo, sendo esse *output* dado quando é

atingida a mínima potência eléctrica definida anteriormente para o comando “linear”. A figura 33 ilustra o que foi dito anteriormente baseado numa análise ao comando “linear”.

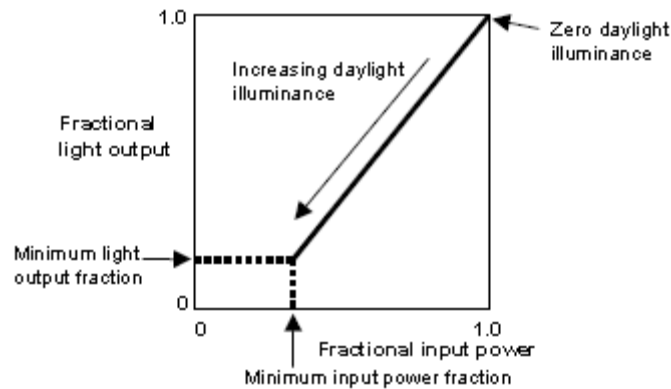


Figura 33 – Controlo da iluminação artificial interior com o comando “linear” – [Fonte: (http://www.designbuilder.co.uk/programhelp/_lighting_control.htm)].

Deve-se referir também, que para as diversas simulações realizadas, o sensor que o *software* permite definir, para zonar os compartimentos, foi estrategicamente colocado no centro dos espaços analisados, tendo esta colocação o principal objectivo, de não beneficiar em demasia a iluminação natural, o que poderia ocorrer na situação de colocar o mesmo junto a uma janela, ou pelo contrário, prejudicar em demasia a iluminação natural, colocando na extremidade do espaço e oposto à janela, situações estas que induziriam a resultados falsos, sendo que na primeira situação a resultados bastantes optimistas e no segundo caso a resultados pessimistas, pelo que, pelos motivos atrás expostos, optou-se pela solução intermédia para que as diversas simulações efectuadas garantissem resultados justos e coerentes.

Esquecendo um pouco as análises efectuadas aos diferentes tipos de sistemas de climatização, no gráfico seguinte é ilustrado os consumos energéticos com os três controlos disponíveis no *software* para a iluminação artificial, sendo que na nova simulação dinâmica o sistema de climatização analisado é o optimizado, diferindo apenas o tipo de vidro seleccionado e respectivamente as suas propriedades, sendo o mesmo duplo com um factor solar de 0.48 e um índice de transmissibilidade da luz solar de 66.4%, valores estes superiores face ao vidro seleccionado e analisado no capítulo 8.2. Não se deve esquecer e conforme pode ser visualizado nas plantas do edifício no capítulo 5 “Caso em Estudo”, que não existe qualquer meio de sombreamento interior nos vãos envidraçados, que por um lado apresenta a vantagem de existir a possibilidade de potenciar a iluminação natural nos diferentes espaços, no entanto os vãos envidraçados não possuindo meios de sombreamento interiores, acabam também um pouco por serem penalizados, visto que o RCCTE limita o factor solar do vidro e indirectamente a transmissibilidade da luz solar do mesmo.

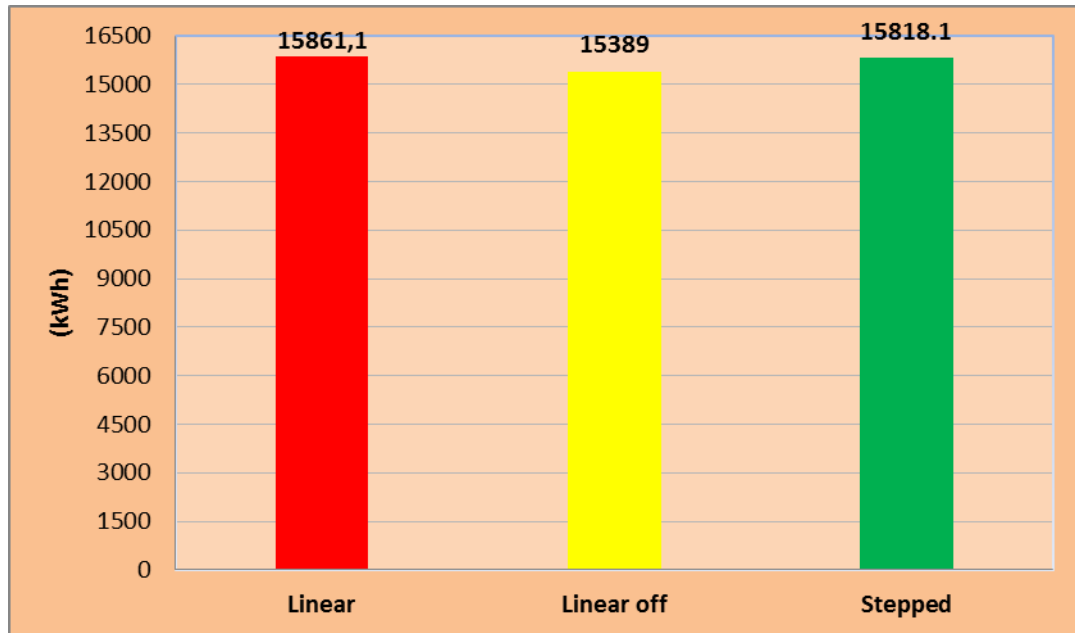


Gráfico 20 – Resultados do consumo eléctrico total relativo à iluminação artificial com diferentes tipos de controlo.

Ao analisar os consumos energéticos relativos à iluminação natural, com diferentes tipos de controlo, **é notória a redução no consumo energético relativo à iluminação interior**, quando é empregue um controlo que permita racionalizar o uso da mesma. Se recuar até ao capítulo 7.1 e visualizar a tabela 21, verifica-se que **o controlo da iluminação interior deve ser sempre incorporado num edifício que aspira a ser eficientemente energético, pelo que a diferença nos consumos energéticos** antes e após da incorporação de comando e controlo da iluminação interior é de cerca de **26.3%**. Convém frisar que este valor apenas reflecte e **incorpora a área climatizada**, sendo esta a área que engloba o âmbito da presente tese, no entanto, o consumo energético do edifício é global incorporando diversas salas técnicas em que não foi incorporado qualquer controlo no uso da iluminação interior dos espaços, **sendo expectável uma redução brusca no consumo energético do edifício**, se o mesmo controlo, utilizado nos espaços climatizados, fosse empregue também ao restante do edifício.

Vejamos agora o mapa da intensidade luminosa num dos espaços climatizados, o Auditório por exemplo.

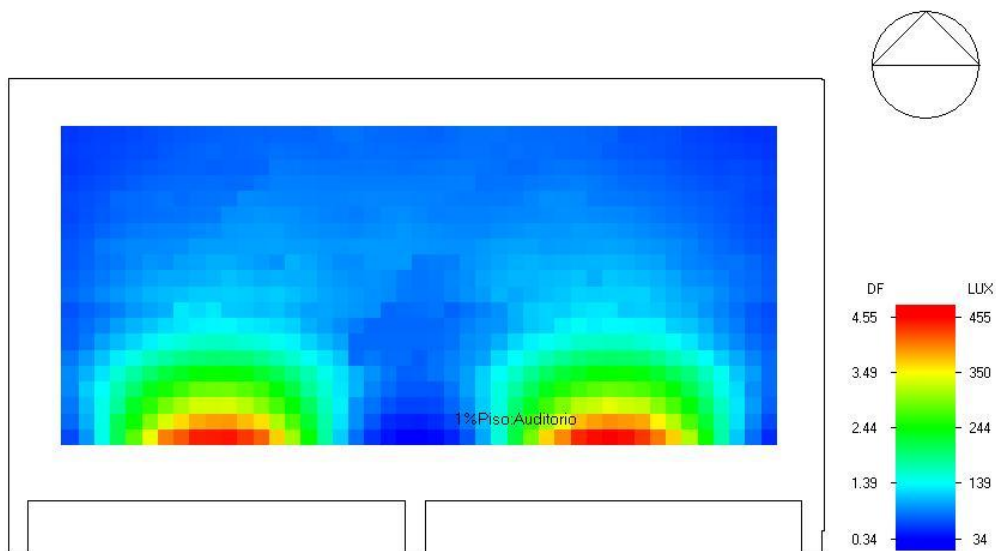


Figura 34 - Intensidade luminosa no espaço designado por “Auditório” – (Software: Design Builder, módulo “Daylighting”).

Visualizando a figura 34 verifica-se que junto aos envidraçados a intensidade luminosa é máxima, sendo o seu valor igual a 455 Lux, bem acima da intensidade luminosa fornecida pelas iluminarias, projectadas para incrementar uma intensidade de 400 Lux. No entanto a inclusão da figura 34 e 35 da minha parte tem um objectivo simples que passo a citar de seguida. Primeiro analisaremos a figura 35.

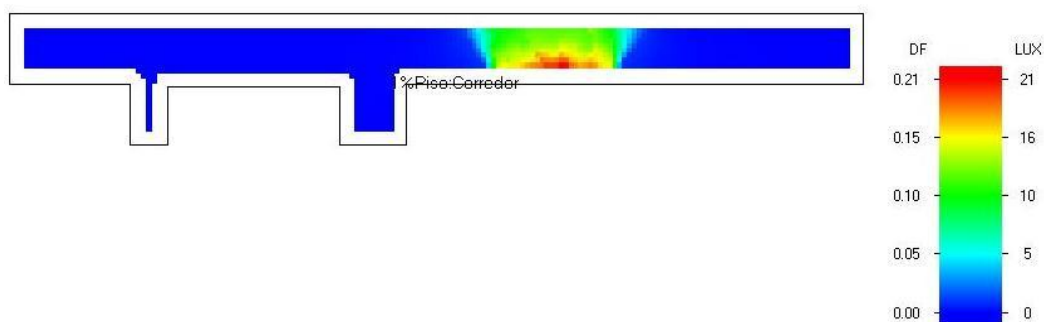


Figura 35 - Intensidade luminosa no espaço designado por “Corredor” – (Software: Design Builder, módulo “Daylighting”).

Analisando a figura 35 em que se pode visualizar a intensidade luminosa prevista para o **corredor**, **é facilmente perceptível que este nunca terá um contributo real da iluminação natural**, pelo que na minha opinião é contranatura dotar ou arquitectar um espaço apenas com iluminação artificial, principalmente se pensarmos que o mesmo é o único que dá acesso a todas as salas climatizadas, sala técnica do AVAC e sanitários do primeiro piso, pelo que o mesmo será um dos compartimentos do edifício com maior taxa de utilização. Está provado em vários artigos científicos da especialidade, que os utilizadores dos edifícios se sentem mais confortáveis, se estiverem em contacto com espaços que sejam abrangidos com iluminação natural. **O ser**

humano necessita de luz solar para viver, pelo que os edifícios deverão atender a essa necessidade intrínseca ao próprio homem. Chamo a atenção do leitor que apesar de ser representado áreas a vermelho na área do corredor, a escala da intensidade luminosa (Lux) foi reduzida cerca de 22 vezes face à figura 34.

O objectivo fundamental da introdução das figuras 34 e 35, é demonstrar que o consumo energético referente à iluminação interior dos espaços climatizados, pode ser ainda mais reduzido, com a introdução de meios que permitam a entrada de mais luz solar, pelo que, na figura 36 é proposto a introdução de “dentes de serra” que permitam aproveitar ainda mais o que o Sol nos fornece gratuitamente e aproveitar a luz solar que existe e que coincide com o período de funcionamento do edifício. A localização dos “dentes de serra”, teve por base as figuras 34 e 35, sendo a localização de um deles coincidente com a zona menos favorecida através de iluminação natural e visível na figura 34, junto à parede que contacta com o corredor, atravessando o mesmo transversalmente todas as diferentes zonas climatizadas conforme pode ser visível na figura 36. O outro “dente de serra” foi colocado estrategicamente ao longo de todo o corredor para promover a devida iluminação natural ao longo do mesmo.

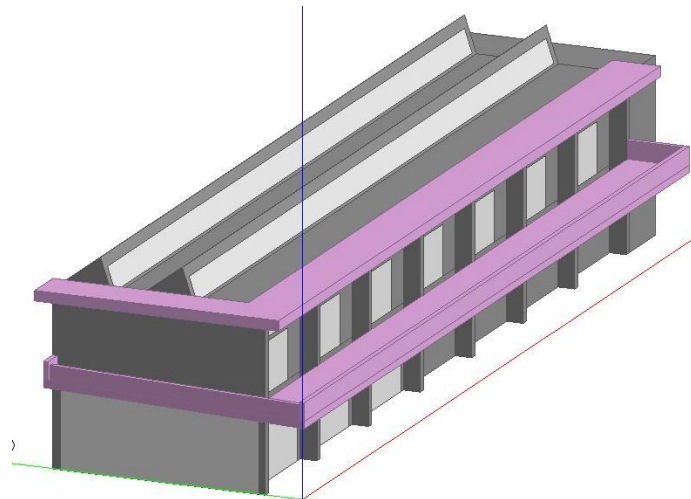


Figura 36 – Edifício em estudo com inclusão de dois “dentes-de-serra” - (Software: Design Builder).

As figuras 37 e 38 pretendem ilustrar o novo mapa da intensidade luminosa originada com a inclusão dos “dentes de serra” ilustrados na figura 36.

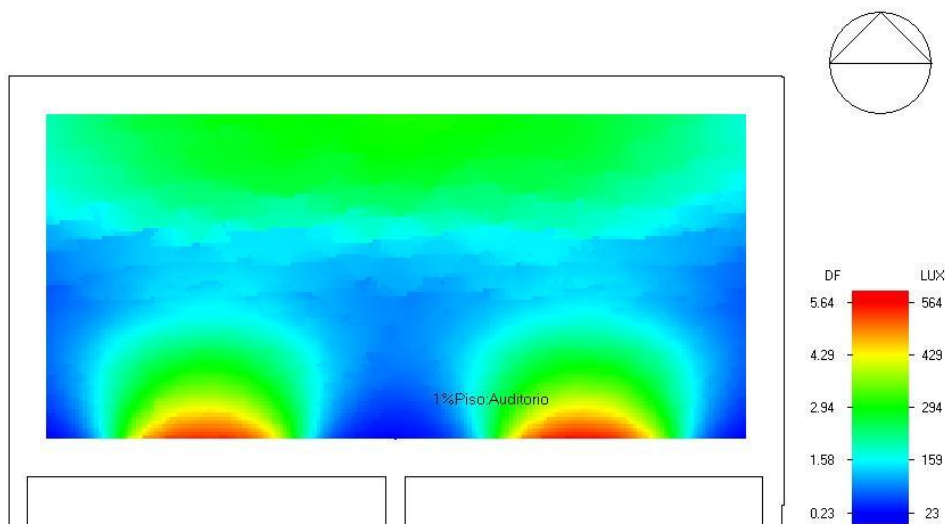


Figura 37 – Intensidade luminosa no espaço designado por “Auditório” com a inclusão de “dentes-de-serra” na cobertura do edifício (Software: Design Builder, módulo “Daylighting”).

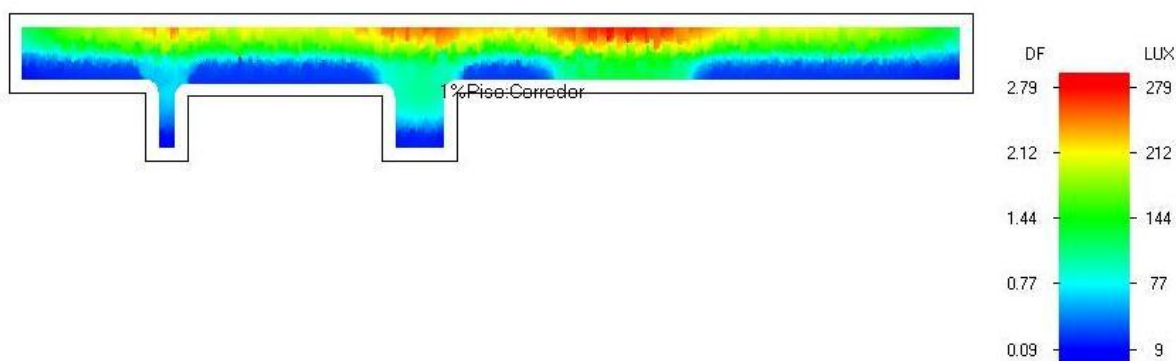


Figure 38 – Intensidade luminosa no espaço designado por “Corredor” com a inclusão de “dentes-de-serra” na cobertura do edifício (Software: Design Builder, módulo “Daylighting”).

Através da visualização das figuras 37 e 38 e comparando-as com as figuras 34 e 35, é notório o efeito da introdução dos “dentes-de-serra” na cobertura, proporcionando um aumento significativo da intensidade luminosa nestes dois espaços, principalmente no corredor. Conforme pode ser visualizado na figura 38, pode-se afirmar através dos resultados obtidos pelo *Design Builder*, que com adopção de meios que promovam a utilização e captação da iluminação natural, é conseguida uma intensidade luminosa média na maioria da área do corredor compreendida entre o intervalo de 150 a 212 Lux, pelo que, temos zonas onde é mesmo excedido esse valor chegando o mesmo a valores na ordem dos 280 Lux. Não sendo um espaço onde as exigências de iluminação sejam das maiores, sendo os corredores tradicionalmente equipados com luminárias que garantam uma intensidade luminosa entre os 100 até 150 Lux, e através da visualização da figura 38, verifica-se que esse nível de intensidade luminosa é quase conseguido recorrendo apenas a iluminação natural em praticamente toda a sua área, excepto, nas zonas marcadas a

azul-escuro, onde aí poderia ser combinada com iluminação artificial, de modo a compensar pequenas lacunas/falhas onde a iluminação natural é insuficiente.

O objectivo da inclusão desta breve análise sobre a iluminação natural nas considerações finais, é consciencializar que a mesma quando bem projectada e potenciada num edifício, aliada a um controlo da iluminação artificial de acordo com a mesma, pode ser quase suficiente para iluminar a maioria dos espaços interiores, salvo algumas excepções, onde a intensidade luminosa terá que ser controlada, o que acontece no caso por exemplo de um bloco operatório, no entanto, para um edifício comum de serviços a iluminação natural poderá ser um óptimo aliado para baixar os consumos energéticos do mesmo, sendo que, primeiramente, em vez de se pensar em reduzir consumos energéticos nos sistemas de AVAC, parece-me mais racional abordar e estudar primeiro a arquitectura e a concepção do mesmo, sendo que, na minha opinião pode ser uma das maiores, **ou senão mesmo a maior medida de eficiência energética nos edifícios.**

No capítulo dos Anexos, referente ao subcapítulo das considerações finais é apresentado o diagrama **“Daylight”** fornecido pelo *Design Builder* para o primeiro piso, onde se pode visualizar para a área em estudo da presente tese, o mapa da intensidade luminosa para todos os compartimentos com a inclusão dos dentes de serra ilustrados na figura 36.

Gostaria de lançar duas questões na presente tese, sendo a última uma questão/proposta de melhoria que visa a eficiência energética dos edifícios. **Será este o tipo de construção sustentável que pretendemos implementar, em que tradicionalmente os aspectos arquitectónicos prevalecem sobre os aspectos técnicos? A par de um regulamento que obriga os sistemas de climatização a cumprirem com um vasto leque de requisitos/pressupostos e regras, não deveria existir um semelhante na concepção e arquitectura de um edifício, promovendo o uso por exemplo, de uma correcta arquitectura bioclimática para tornar o edifício energeticamente sustentável?**

Referências Documentais

1. Decreto-Lei nº 78/2006 de 4 de Abril, Sistema Nacional de Certificação Energética e da Qualidade do Ar Interior nos Edifícios
2. Decreto-Lei nº 79/2006 de 4 de Abril, RSECE - Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios
3. Decreto-Lei nº80/2006 de 4 de Abril, RCCTE - Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios
4. ASHRAE Handbook - HVAC Systems and Equipment (SI Edition) 2008.
5. ASHRAE Handbook - Fundamentals (SI Edition) 2005.
6. ASHRAE Handbook – HVAC Systems and equipment 2004.
7. EU, 2007, Plano de acção sobre eficiência energética 2007-2012.
8. Roriz, Luís, 2006, Climatização – Concepção, instalação e condução de sistemas, Edições Orion, Amadora
9. Gonçalves, Hélder; Graça, João, 2004, Conceitos Bioclimáticos para os Edifícios em Portugal, INETI, Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação.
10. Çengel Y.: Introduction to thermodynamics and heat transfer. McGraw-Hill, 1997.
11. Departamento de energia dos Estados Unidos. Getting Started Manual. Documento de apoio sobre o software “Energy Plus”, 2009
12. Departamento de energia dos Estados Unidos. Input-Output Reference. Manual sobre o software “Energy Plus”, 2009
13. Departamento de energia dos Estados Unidos. Site do software “Energy-Plus”. <<http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/>>
14. Site do software “Design Builder”. <www.designbuilder.co.uk>
15. Site do software “Design Builder”. <www.designbuilder.co.uk/helpv3.0/>
16. Site do software “Trace700”. www.trane.com/COMMERCIAL/Products/Default.aspx?i=876
17. CIBSE, Guide B - Heating, ventilating, air conditioning and refrigeration, 2005.
18. ASHRAE, “HVAC System Analysis and Selection,” em *HVAC System & Equipment*, 2008.
19. LNEG, *Manual SolTerm 5.1.4*, 2012
20. “DesignBuilder,” [Online]. Available: <http://www.designbuilder.co.uk/content/view/7/13/>. [Acedido em 7 Junho 2012]
21. ASHRAE, “Chapter 09 - Thermal Comfort,” em *Fundamentals*, 2009

22. I. 7730, *Ergonomics of the thermal environment — Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria*, 2005
23. A. S. 55P, *Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*, 2003
24. CIBSE, Guide A - Environmental design 7th Edition, 2007
25. I. Sarmiento, “Apontamentos Climatização,” em *Mestrado em Energias Sustentáveis*, ISEP, 2011-2012.
26. Carlos A. Pina dos Santos, Luis Matias, 2006, ITE 50, LNEC
27. ASHRAE Handbook - Fundamentals (SI Edition) 2009
28. Spitler, J., Fisher, D., & Pederson, C. (1997). *The Radiant Time Series Cooling Load Calculation Procedure*. ASHRAE
29. McQuiston, Faye; Parker, Jerald; Spitler, Jeffrey, 2004, Heating, Ventilating and Air Conditioning Analysis and Design, Sixth Edition, Editora Wiley
30. Manual Caleffi – Piso radiante
31. Manual Daikin – Sistema VRV®
32. Manual da Mitsubishi – Air Conditioning
33. IST, 2004, “Energia Solar Térmica, Manual sobre Tecnologias, Projecto e Instalação
34. LNEG, *Manual SolTerm 5.1.4*, 2012
35. A. S. 55P, *Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*, 2003.
36. ASHRAE 140, *Standard Method of Test for Evaluation of Building Energy Analysis Computer Program*, 2004
37. Mitalas, G. P. (1973). *Transfer Function Method of Calculating Cooling Loads, Heat Extraction & Space Temperature*. OTTAWA: ASHRAE JOURNAL.
38. ASHRAE Design Guide, *Advanced Energy Design Guide for Small Office Buildings*, 2004.

Anexos

Anexo A. Sistemas de AVAC – “Tudo-Água” – Sistema piso radiante

Regulação termostática

São grupos com reguladores termostáticos que accionam válvulas de duas ou de três vias. Servem para manter constante (segundo o valor pedido) a temperatura da água enviada ao chão radiante. O fluido proveniente do circuito da caldeira, por exemplo, é injectado no circuito do piso radiante através da acção reguladora de uma válvula termostática de 2 vias com sonda de imersão. A temperatura dos locais é regulada com um termóstato ambiente que comanda a electrobomba do piso radiante. Um termóstato de segurança bloqueia a electrobomba, se for ultrapassada a temperatura máxima de exercício. A válvula de regulação serve, se necessário, para equilibrar os circuitos com o objectivo de garantir a injeção do fluido a alta temperatura no circuito do piso radiante.

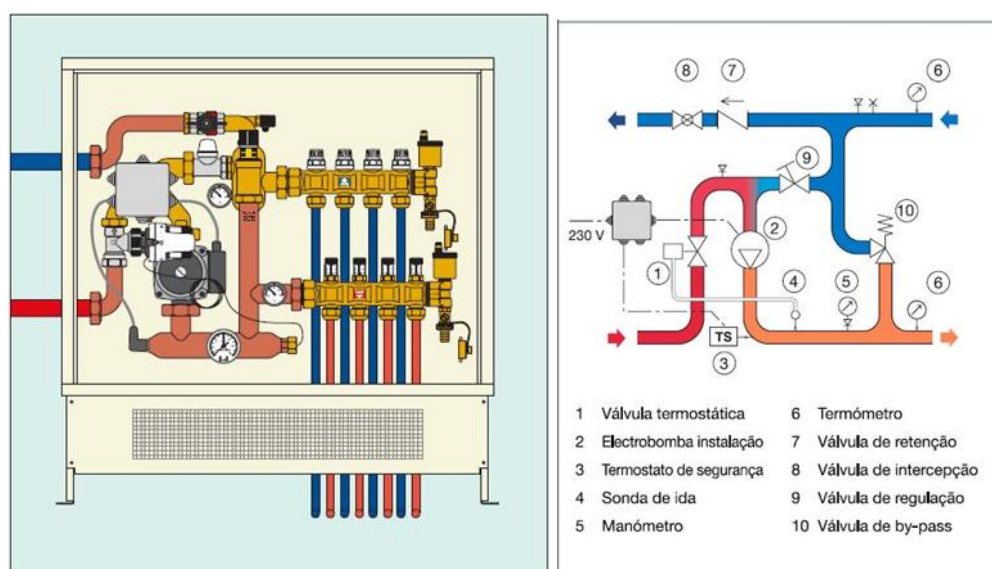


Figura A1 – Grupo com regulação termostática incorporando uma válvula de duas vias com o objectivo de manter constante a temperatura da água enviada ao chão radiante.

Regulação electrónica com compensação do ponto fixo

São grupos com reguladores electrónicos que accionam válvulas motorizadas de três vias. Servem para manter a ponto fixo simples ou compensado (veremos melhor em seguida o significado deste termo) a temperatura da água enviada ao chão radiante. A regulação ocorre por mistura de acordo com o esquema abaixo indicado. Um termóstato de segurança fecha a válvula misturadora e bloqueia a bomba do chão radiante, quando for superada a temperatura máxima de exercício.

Estão disponíveis *kit's* conforme é ilustrado na figura 78, que permitem servir com o mesmo grupo quer o chão radiante, quer os terminais de alta temperatura.

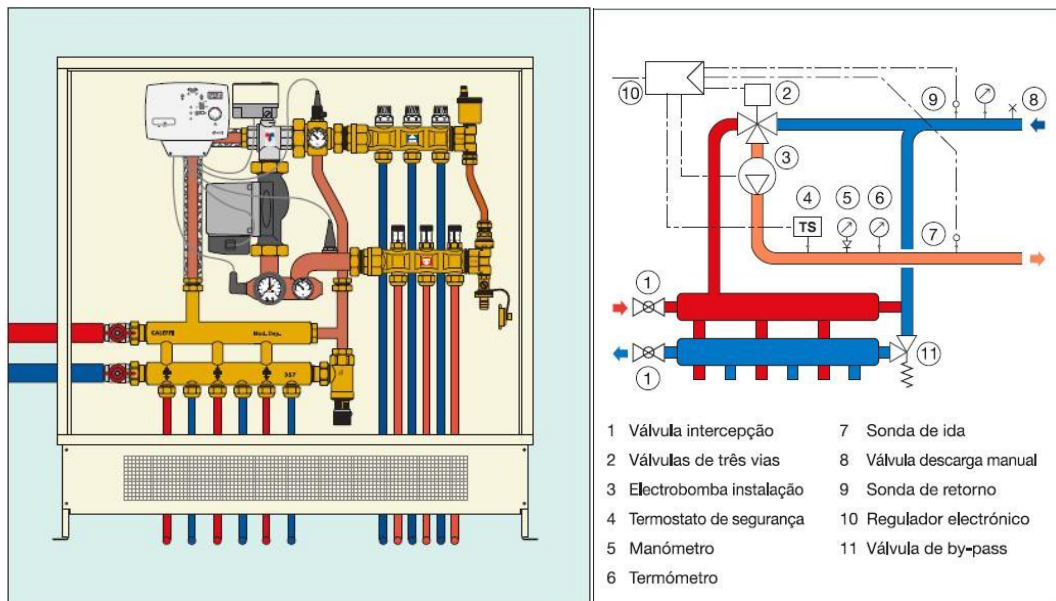


Figura A2 – Grupo com regulação electrónica incorporando uma válvula de três vias com o objectivo de manter a ponto fixo simples ou compensado a temperatura da água enviada ao chão radiante e se necessário, pois este sistema permite a terminais de alta temperatura como o caso de radiadores.

A regulação da água enviada ao chão radiante pode ocorrer segundo duas opções: **a ponto fixo simples ou ponto fixo compensado**. No primeiro caso a água é enviada ao chão radiante com temperatura constante, e no segundo caso a água é enviada ao chão radiante com temperatura que depende de duas grandezas: a temperatura de ida estabelecida no selector e o salto térmico (ΔT) efectivo entre ida e retorno.

Na prática, se o ΔT for pequena envia-se ao pavimento radiante água a uma temperatura mais baixa da estabelecida no selector. Se pelo contrário, a ΔT for muito elevada envia-se ao chão radiante água a uma temperatura mais alta. O objectivo é o de adequar melhor o calor emitido aos pedidos efectivos. Graficamente, o campo de trabalho na fase de compensação pode ser assim representado:



Figura A3 – Campo de compensação com ponto fixo compensado

Regulação climática

São grupos aptos a regular a temperatura da água enviada ao chão radiante relativamente à temperatura externa e são constituídos por um único bloco que serve também de suporte ao regulador, aos equipamentos de controlo e de segurança e à bomba.

São grupos constituídos essencialmente por uma válvula misturadora, servomotor, regulador, sondas de temperatura, termómetros, *by-pass* diferencial e casquilhos de ligação ao circuito primário e ao circuito de chão radiante. O regulador, normalmente instalado no corpo do grupo, também pode ser posicionado à distância. A regulação ocorre por mistura segundo a figura apresentada em baixo.

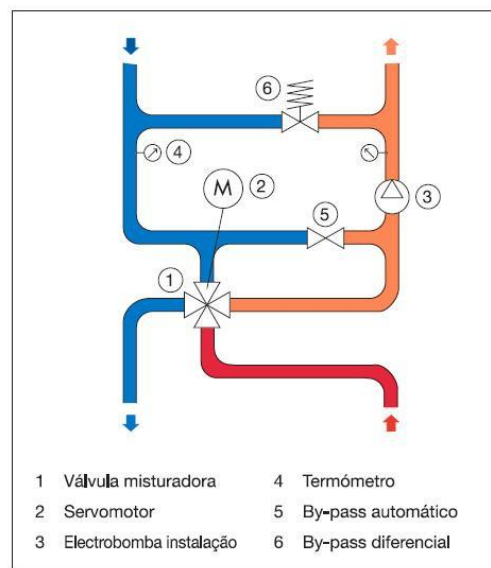


Figura A4 – Regulação climática

Anexo B. Conforto Térmico – Norma ISO 7730

Metabolismo

O metabolismo corresponde à taxa de utilização de energia pelo corpo. O metabolismo subdivide-se no metabolismo basal e de actividade. O metabolismo basal corresponde à taxa verificada durante o repouso absoluto, mas em vigília. O metabolismo de actividade está relacionado com o esforço físico, e dependente desse esforço o mesmo pode ser superior ao metabolismo basal várias vezes.

Para a mesma actividade, verificou-se que o metabolismo varia principalmente com a área corporal, pelo que é geralmente definido nas unidades W/m^2 , tomando-se o valor de $1.8 m^2$ como área corporal de um adulto. Embora não referido na ISO 7730, convém ter em conta que a área corporal (m^2) está correlacionada com a altura (em m) e com o peso (em kg), tal relação expressa pela equação 1.

$$\text{Área} = 0.202 \times \text{Altura}^{0.725} \times \text{Peso}^{0.425}$$

Equação B1 – Área corporal de um adulto

A relação entre a actividade e o metabolismo (valor total, isto é, soma da parcela basal com a de actividade) apresenta-se na tabela 1. Uma forma de simplificar a análise do metabolismo, consistiu na definição da unidade met, onde 1 met corresponde ao metabolismo de uma pessoa sentada a descansar ($1 \text{ met} = 58.15 W/m^2$).

Tabela B1 – Valores de metabolismo para diferentes actividades (Fonte: ISO 7730 – Anexo B – Tabela B.1)

Activity	Metabolic rate	
	W/m^2	met
Reclining	46	0,8
Seated, relaxed	58	1,0
Sedentary activity (office, dwelling, school, laboratory)	70	1,2
Standing, light activity (shopping, laboratory, light industry)	93	1,6
Standing, medium activity (shop assistant, domestic work, machine work)	116	2,0
Walking on level ground:		
2 km/h	110	1,9
3 km/h	140	2,4
4 km/h	165	2,8
5 km/h	200	3,4

Trabalho

Tipicamente a avaliação de conforto verifica-se em casos em que o trabalho realizado é nulo ou corresponde apenas a dissipações por atrito, tais como, pessoas sentadas ou em andamento contínuo. A quantificação do trabalho realizado para o exterior corresponde à variação da energia cinética e potencial (por exemplo, na subida de escadas).

Vestuário

O vestuário é caracterizado através da sua resistência térmica, I_{clu} , nas unidades m^2K/W . À semelhança do metabolismo, o vestuário apresenta uma unidade própria, o clo, que corresponde à resistência térmica de $0.155 m^2K/W$. A tabela 2 apresenta os valores de resistência térmica, I_{clu} , de diferentes tipos de vestuário, bem como a relação e possíveis mudanças que o vestuário poderá introduzir face à temperatura operativa óptima para o ocupante.

Tabela B2 - Excerto dos valores de metabolismo para diferentes actividades (Fonte: ISO 7730 – Anexo C – Tabela C.2)

Garment	I_{clu}		Change of optimum operative temperature, °C
	clo	$m^2 \cdot K/W$	
Underwear			
Panties	0,03	0,005	0,2
Underpants with long legs	0,10	0,016	0,6
Singlet	0,04	0,006	0,3
T-shirt	0,09	0,014	0,6
Shirt with long sleeves	0,12	0,019	0,8
Panties and bra	0,03	0,005	0,2
Shirts/Blouses			
Short sleeves	0,15	0,023	0,9
Light-weight, long sleeves	0,20	0,031	1,3
Normal, long sleeves	0,25	0,039	1,6
Flannel shirt, long sleeves	0,30	0,047	1,9
Light-weight blouse, long sleeves	0,15	0,023	0,9
Trousers			
Shorts	0,06	0,009	0,4
Light-weight	0,20	0,031	1,3
Normal	0,25	0,039	1,6
Flannel	0,28	0,043	1,7

Conforto térmico – “Parâmetros de conforto – parâmetros ambientais”

Temperatura do ar e temperatura operativa

Corresponde à temperatura seca do ar (temperatura de bolbo seco). A temperatura do ar é a principal variável do conforto térmico. A sensação de conforto baseia-se na perda de calor do corpo pelo diferencial de temperatura entre a pele e o ar, complementada pelos outros mecanismos termo-reguladores. Para o conforto térmico, é interessante conhecer também a temperatura operativa. A temperatura operativa é uma temperatura teórica que provoca uma perda de calor equivalente a todos os fenómenos que provocam esta perda caso o corpo estivesse em um ambiente imaginário submetido apenas a uma temperatura homogénea.

Humidade do ar

As equações de balanço energético são deduzidas com base na pressão parcial do vapor de água no ar. Definido o estado higrocópico do ar é em termos da temperatura seca, T em °C, e a humidade relativa, HR entre 0 e 1, a pressão parcial do vapor de água, p_{vap} em Pa, é obtida pela equação 2.

$$p_{vap} = HR \times p_{sat}(T)$$

Equação 2 – Pressão parcial do vapor de água

Em que p_{sat} em função da temperatura é dado por:

$$p_{sat}(T) = 1000 \times e^{16.6536 \frac{4030.183}{T+273.15}}$$

Equação 3 – Pressão de saturação da água para uma dada temperatura

Temperatura média radiante

Corresponde à temperatura média das superfícies opacas visíveis que participam no balanço radiativo com a superfície exterior do vestuário. Este termo é particularmente difícil de definir com exactidão quer pela dificuldade em correctamente avaliar os factores de forma, quer pela influência da componente reflectiva, no entanto uma aproximação válida para a temperatura média radiante pode ser visualizada pela equação 4 e é baseada na estimativa da temperatura para o centro geométrico de um dado compartimento, resultado da temperatura das suas superfícies ponderada pelas respectivas áreas.

$$Tr \approx Tm = (A1.Ts1 + A2.Ts2 + \dots + An.Tsn)/(A1 + A2 + \dots + An)$$

Equação 4 – Temperatura média radiante

Em que:

Tr - temperatura média radiante, K ou °C;

Tsn – temperatura da superfície n, K ou °C;

An - área da superfície n, m².

Em locais existentes pode ser medida com rigor através de um termómetro de bolbo negro. A medição da temperatura média radiante baseada num termómetro de bolbo negro resulta do balanço das trocas de calor por convecção natural e forçada para o ar ambiente (função da temperatura ambiente e da velocidade do ar) e por radiação para as superfícies envolventes conforme é ilustrado na equação 5.

$$Tr^4 = Tb^4 + 0.247 \cdot 10^9 \cdot V^{\frac{1}{2}} \cdot (Tb - Ta)$$

Equação 5 – Temperatura média radiante

Em que:

Tr – temperatura média radiante, K;

Tb – temperatura de bolbo negro, K;

Ta – temperatura do ar ambiente, K;

V – velocidade média do ar, m/s.

Conforto térmico – “Equação do conforto térmico”

A equação de conforto térmico permite calcular o termo de acumulação de energia no corpo, S, correspondente à diferença entre o metabolismo desenvolvido no corpo e a transferência de calor para o ambiente, sendo apresentada na equação 6, dividida por parcelas.

M – W	(Metabolismo e trabalho)
$-3.05 \times 10^{-3} (5733 - 6.99((M - W) - p_{vap}))$	(Difusão de vapor)
$-0.42 ((M - W) - 58,15)$	(Transpiração)
$-1.7 \times 10^{-5} M(5867 - p_{vap})$	(Respiração latente)
$-0.0014 \times M (34 - T_{ar})$	(Respiração sensível)
$-3.96 \times 10^{-8} f_{vest} ((T_{vest} + 273)^4 - (T_{rad} + 273)^4)$	(Radiação)
$-f_{vest} \times h \times (T_{vest} - T_{ar}) =$	(Convecção)
+S	(Acumulação de calor)

Sendo que:

- M é o metabolismo, em W/m² (área corporal).
- W é o trabalho realizado para o exterior, em W/m² (área corporal)
- p_{vap} é a pressão parcial do valor de água do ar ambiente, em Pa.
- T_{ar} é a temperatura seca do ar ambiente, em °C.
- f_{vest} é um factor de vestuário, adimensional (ver secção 7.4.2)
- T_{vest} é a temperatura exterior do vestuário, em °C
- T_{rad} é a temperatura média radiante dos elementos opacos do espaço, em °C.

- h é o coeficiente de convecção entre a superfície exterior do vestuário e o ar exterior, em W/m^2K (área exterior do vestuário)
- S é o termo de acumulação de energia no corpo, em W/m^2 (área corporal)

Temperatura exterior de vestuário

A temperatura da superfície do vestuário é obtida por balanço energético igualando a transferência por condução da pele para o vestuário à transferência de calor por convecção e radiação, resultando na equação não linear que se apresenta na equação 8. Nesta equação I_{clu} corresponde à resistência térmica do vestuário (tabela2), em m^2K/W , e T_{pele} à temperatura da pele, em $^{\circ}C$, correlacionada na equação 7 com o metabolismo e o trabalho realizado.

$$T_{pele} = 35.7 - 0.0275 (M-W)$$

Equação 7 – Metabolismo e trabalho realizado afecta à pele humana

$$T_{vest} = T_{pele} - I_{clu} [3.96 \times 10^{-8} \times f_{vest} \times ((T_{vest} + 273)^4 - (T_{rad} + 273)^4) + f_{vest} \times h (T_{vest} - T_{ar})]$$

Equação 8 – Temperatura da superfície do vestuário

Factor de vestuário

O factor de vestuário define-se pela razão entre a área exterior do vestuário e a área corporal, sendo, conseqüentemente, um valor adimensional e superior à unidade. O factor de vestuário correlaciona-se com a resistência térmica do vestuário através da equação 9, ou graficamente através da figura 1.

$$f_{vest} = 1.00 + 1.290 \times I_{clu} \quad \text{para } I_{clu} < 0.078 \text{ m}^2K/W$$

$$f_{vest} = 1.05 + 0.645 \times I_{clu} \quad \text{para } I_{clu} > 0.078 \text{ m}^2K/W$$

Equação 9 – Factor de vestuário

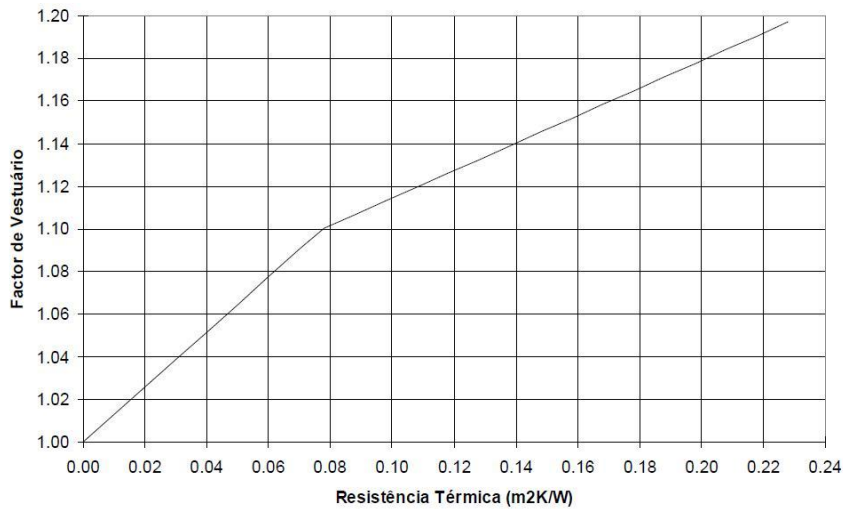


Figura B1 - Factor de vestuário em função da resistência térmica do vestuário

Factor de convecção

A norma ISO 7730 define o cálculo do coeficiente de convecção natural e forçada pelas seguintes equações:

$$h = 2.38 (T_{\text{vest}} - T_{\text{ar}})^{0.25} \quad (\text{Convecção natural})$$

$$h = 12.1 \times v^{1/2} \quad (\text{Convecção forçada})$$

Equação 10 e 11 – Coeficiente de convecção natural e forçada de acordo com a ISO-7730

Evaporação

As perdas por evaporação de água na pele são o principal mecanismo de perda de calor do corpo humano, sendo este o mecanismo primordial de regulação da temperatura do corpo quando a temperatura ambiente está maior do que a da pele (acima de 33°C).

Quanto mais a temperatura ambiente se aproxima do intervalo de temperaturas entre os 32-33°C, maior o desconforto térmico. Se a temperatura ambiente superar tal intervalo e a evaporação do suor for dificultada, não apenas o desconforto térmico se torna cada vez mais extremo como também pode levar à morte por hipertermia.

A evaporação do suor permite o arrefecimento evaporativo do corpo, possibilitando que a superfície do corpo possa alcançar temperaturas menores do que a ambiente, dissipando o calor gerado pelo próprio metabolismo corporal e a garantindo manutenção da temperatura corporal interna em torno de 36°C.

A perda de calor por evaporação na pele depende da diferença entre a pressão de vapor da água junto à pele e no ar ambiente, da permeabilidade do vestuário e da quantidade de humidade na

pele. A difusão de vapor depende da diferença de pressão de vapor entre a pele (p_{pele}) e a atmosfera (p_{vap}) sendo correlacionada por $3.05 \times 10^{-3} (p_{pele} - p_{vap})$, em W/m^2 , sendo que a pressão de vapor (p_{vap}) é função da temperatura da pele e então a expressão anterior poderá tomar a seguinte forma $3.05 \times 10^{-3} (256 \times T_{pele} - 3373 - p_{vap})$, conduzindo à expressão final do termo de evaporação substituindo T_{pele} pela correlação anteriormente apresentada, função do metabolismo e do trabalho (Equação 6).

Respiração

Trata-se de uma perda de calor composta por uma parcela sensível e outra latente, devido ao aquecimento do ar respirado e da humidificação do mesmo respectivamente.

$$0.0014 \times M(34 - T_{ar})$$

$$1.7 \times 10^{-5} M(5867 - p_{vap})$$

Equação 12 e 13 – Perda de calor pela respiração parcela sensível e latente

Na equação 12 substituindo pelas condições normal ($T_{ar} = 23^\circ C$ e metabolismo de $90 W/m^2$) esta carga é de $1.3 W/m^2$, podendo ser desprezada.

Na equação 13 substituindo pelas condições normal ($p_{vap} = 1400$ e metabolismo de $90 W/m^2$) esta carga é de aproximadamente de $7 W/m^2$, sendo normalmente desprezada.

Radiação

A constante 3.96×10^{-8} resulta do produto da constante de Boltzmann pelo factor de forma entre o vestuário e o exterior e pelo termo relacionado com as emissividades (considera-se uma emissividade da pele e do vestuário de 1 e 0.95, respectivamente).

Anexo C. Caso em estudo

C1 – Constituição da envolvente

Tabela C1 – Constituição da cobertura - Fluxo Ascendente

Constituição	Espessura (m)	Massa volúmica (kg/m ³)	Condutibilidade térmica (W/m.°C)	Resistência térmica (m ² .°C/W)
Convecção exterior				0.04
Godo médio	0.015	1950	2	-
Poliestireno Expandido	0.040	20	0.037	1.1
Tela impermeabilizadora	0.001	2100	0.7	-
Betonilha de regularização	0.1	2000	1.8	0.06
Laje de betão	0.2	2450	2	0.1
Reboco interior	0.02	2000	1.8	0.011
Convecção interior				0.10
Coefficiente de transmissão térmica (W/m².°C)				0.72

Tabela C2 – Constituição da cobertura - Fluxo Descendente

Constituição	Espessura (m)	Massa volúmica (kg/m ³)	Condutibilidade térmica (W/m.°C)	Resistência térmica (m ² .°C/W)
Convecção exterior				0.04
Godo médio	0.015	1950	2	-
Poliestireno Expandido	0.040	20	0.037	1.1
Tela impermeabilizadora	0.001	2100	0.7	-
Betonilha de regularização	0.1	2000	1.8	0.06
Laje de betão	0.2	2450	2	0.1
Reboco interior	0.02	2000	1.8	0.011
Convecção interior				0.17
Coefficiente de transmissão térmica (W/m².°C)				0.68

Tabela C3 – Constituição da parede exterior

Constituição	Espessura (m)	Massa volúmica (kg/m ³)	Condutibilidade térmica (W/m.°C)	Resistência térmica (m ² .°C/W)
Convecção exterior				0.04
Reboco exterior	0.02	2000	1.8	0.011
EPS	0.07	20	0.037	1.9
Alvenaria tijolo vazado	0.22			0.52
Reboco interior	0.02	2000	1.8	0.011
Convecção interior				0.13
Coefficiente de transmissão térmica (W/m².°C)				0.42

Tabela C4 – Constituição da ponte térmica plana – pilar

Constituição	Espessura (m)	Massa volúmica (kg/m ³)	Condutibilidade térmica (W/m.°C)	Resistência térmica (m ² .°C/W)
Convecção exterior				0.13
Reboco exterior	0.02	2000	1.8	0.011
EPS	0.04	20	0.037	1.1
Betão armado	0.25	2350	2.0	0.125
Reboco interior	0.02	2000	1.8	0.011
Convecção interior				0.04
Coefficiente de transmissão térmica (W/m².°C)				0.78

Tabela C5 – Constituição da parede interior

Constituição	Espessura (m)	Massa volúmica (kg/m ³)	Condutibilidade térmica (W/m.°C)	Resistência térmica (m ² .°C/W)
Convecção interior				0.13
Reboco	0.02	2000	1.8	
Tijolo vazado	0.15			0.39
Reboco	0.02	2000	1.8	
Convecção interior				0.13
Coefficiente de transmissão térmica (W/m².°C)				1.48

Tabela C6 – Constituição do pavimento – Fluxo Ascendente

Constituição	Espessura (m)	Massa volúmica (kg/m ³)	Condutibilidade térmica (W/m.°C)	Resistência térmica (m ² .°C/W)
Convecção interior				0.04
Revestimento interior				-
Betão leve	0.1	600	0.2	0.5
Laje de betão	0.15	2450	2	0.08
Poliestireno extrudido	0.03	30	0.037	0.81
Reboco	0.02	2000	1.8	0.011
Convecção exterior				0.10
Coefficiente de transmissão térmica (W/m².°C)				0.65

Tabela C7 – Constituição do pavimento – Fluxo Descendente

Constituição	Espessura (m)	Massa volúmica (kg/m ³)	Condutibilidade térmica (W/m.°C)	Resistência térmica (m ² .°C/W)
Convecção interior				0.04
Revestimento interior				-
Betão leve	0.1	600	0.2	0.5
Laje de betão	0.15	2450	2	0.08
Poliestireno extrudido	0.03	30	0.037	0.81
Reboco	0.02	2000	1.8	0.011
Convecção exterior				0.17
Coefficiente de transmissão térmica (W/m².°C)				0.62

Tabela C8 – Características dos vãos envidraçados – [Fonte: Saint-Gobain]

Características	Valor	Unidades
Vidro duplo (espessura)	26.4	(mm)
Peso	35.4	(Kg/m ²)
Factor UV (Transmissão)	1%	
Factor luminoso (Transmissão)	64%	
Factor luminoso (Reflexão exterior)	11%	
Factor luminoso (Reflexão interior)	13%	
Factores energéticos (EN 410) - Transmissão	34%	
Factores energéticos (EN 410) – Reflexão exterior	7%	
Factores energéticos (EN 410) – Absorção A1	52%	
Factores energéticos (EN 410) – Absorção A2	6%	
Factores energéticos (EN 410) – Factor solar	0.45	
Factores energéticos (EN 410) – Coeficiente de sombreamento	0.51	
Coeficiente de Transmissão Térmica (U)	2.8	(W/(m ² .°C))

C2 – Inércia Térmica

Tabela C9 – Cálculo e valor obtido para a inércia térmica

Área útil de pavimento	300.3
$\Sigma (Msi.ri.Si)$	168341.9
Inércia térmica	560.6
Classe segundo RCCTE	Forte

C3 – Caudais mínimos de ar novo

Tabela C10 – Cálculo e valor obtido para a inércia térmica

Espaços climatizados	Área (m2)	Pé direito (m)	Volume (m3)	Nº Ocup.	Req.Ocup	Req.Area	Caudal ocup.	Caudal Area	Qmaior	Ev	MEL	Acoplamento	Qagravado	Qperdas	Qttotal
Sala de Reuniões	25.2	3.0	75.6	5.0	30.0	20.0	150.0	504.0	504.0	630.0	1.0	1.0	630.0	648.9	648.9
Gabinete 1	14.1	2.5	35.3	1.0	35.0	5.0	35.0	70.5	70.5	88.1	1.0	1.0	88.1	90.8	90.8
Gabinete 2	14.1	2.5	35.3	1.0	35.0	5.0	35.0	70.5	70.5	88.1	1.0	1.0	88.1	90.8	90.8
Gabinete 3	14.1	2.5	35.3	1.0	35.0	5.0	35.0	70.5	70.5	88.1	1.0	1.0	88.1	90.8	90.8
Sala de Comando	26.2	3.0	78.6	5.0	30.0		150.0	0.0	150.0	187.5	1.0	1.0	187.5	193.1	193.1
Auditório	54.0	3.0	162.0	40.0	35.0		1400.0	0.0	1400.0	1750.0	1.0	1.0	1750.0	1802.5	1802.5

C4 - Coeficiente de redução das perdas térmicas para locais não aquecidos (τ)

Tabela C11 – Cálculo e valor obtido para τ

Tipo de espaço não útil:	Armazém
Ai (m ²)	150
Au (m ²)	>150
Ai/Au	< 1
τ	0.95
Tipo de espaço não útil:	Armazém
Ai (m ²)	39.6
Au (m ²)	>39.6
Ai/Au	< 1
τ	0.95

C5 – Densidade de equipamentos

Tabela C12 – Densidade de potência referente à iluminação dos diferentes espaços climatizados

Espaço	Área (m ²)	Potência (W)	Densidade de potência (W/m ²)
Sala de Reuniões	25.2	125	5.0
Gabinete 1	14.1	127	9.0
Gabinete 2	14.1	127	9.0
Gabinete 3	14.1	127	9.0
Sala de Comando	26.2	260	9.9
Auditório	54.0	160	3.0

C6 – Densidade de iluminação

Tabela C13 – Densidade de potência referente aos equipamentos dos diferentes espaços climatizados

Espaço	Área (m ²)	Potência (W)	Densidade de potência(W/m ²)
Sala de Reuniões	25.2	377	15.0
Gabinete 1	14.1	128	9.1
Gabinete 2	14.1	128	9.1
Gabinete 3	14.1	128	9.1
Sala de Comando	26.2	252	9.6
Auditório	54	936	17.3

C6.1 – Mapa das iluminarias

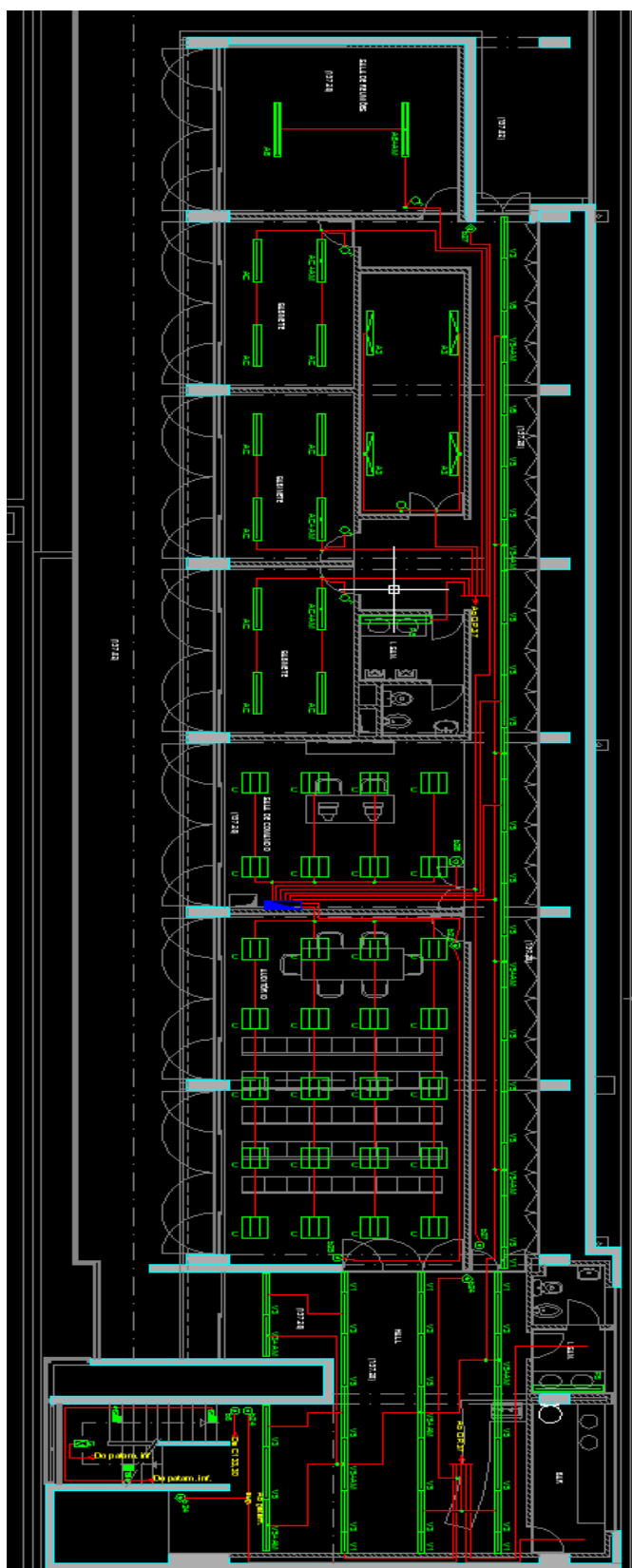


Figura C1 – Localização das iluminarias nos diferentes espaços – 1º piso

C7 – Perfis de utilização

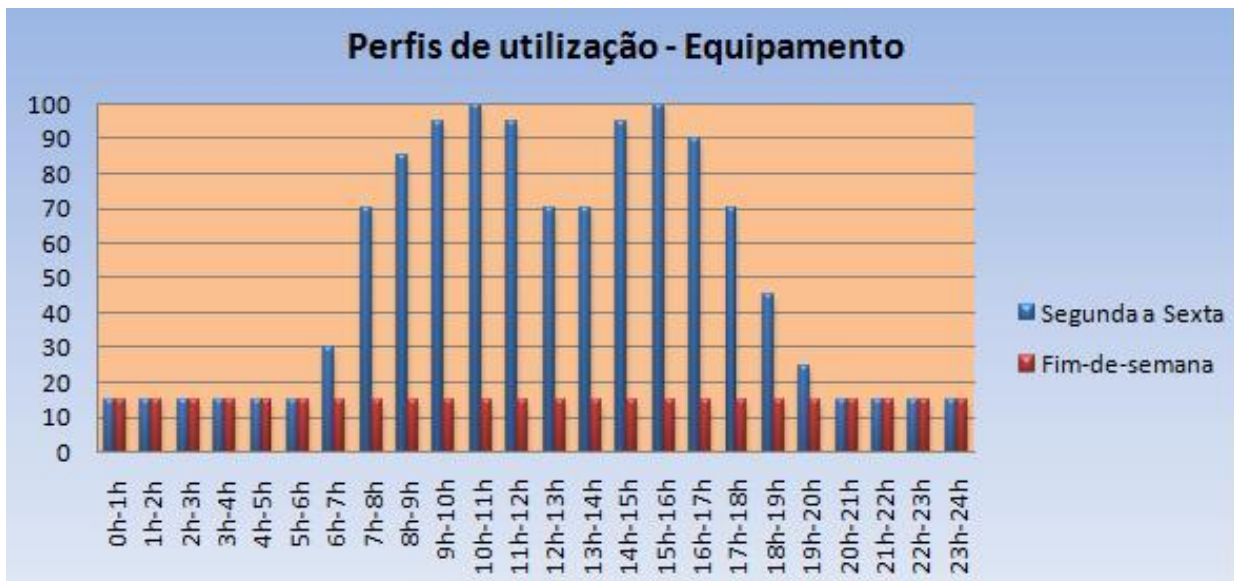


Figura C2 – Perfil de utilização – Equipamento [Fonte: RSECE]



Figura C3 – Perfil de utilização – Ocupação [Fonte: RSECE]



Figura C4 – Perfil de utilização – Iluminação [Fonte: RSECE]

C8 – Esquema aerólico do sistema base de AVAC

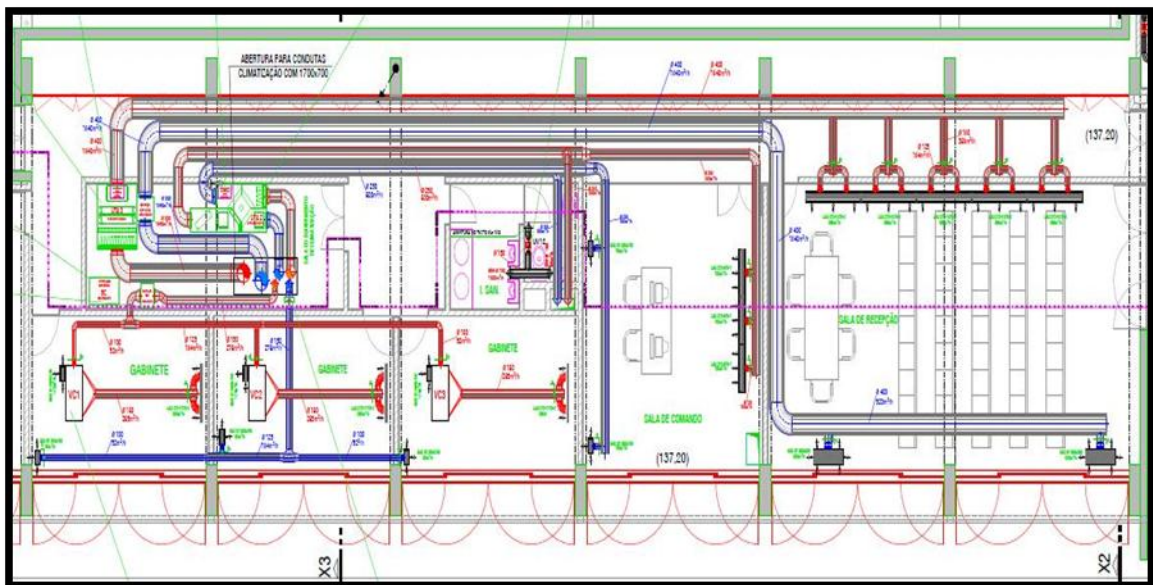


Figura C5 – Esquema aerólico do sistema base de AVAC nos diferentes espaços – 1º piso

C9 – Esquema hidráulico do sistema base de AVAC

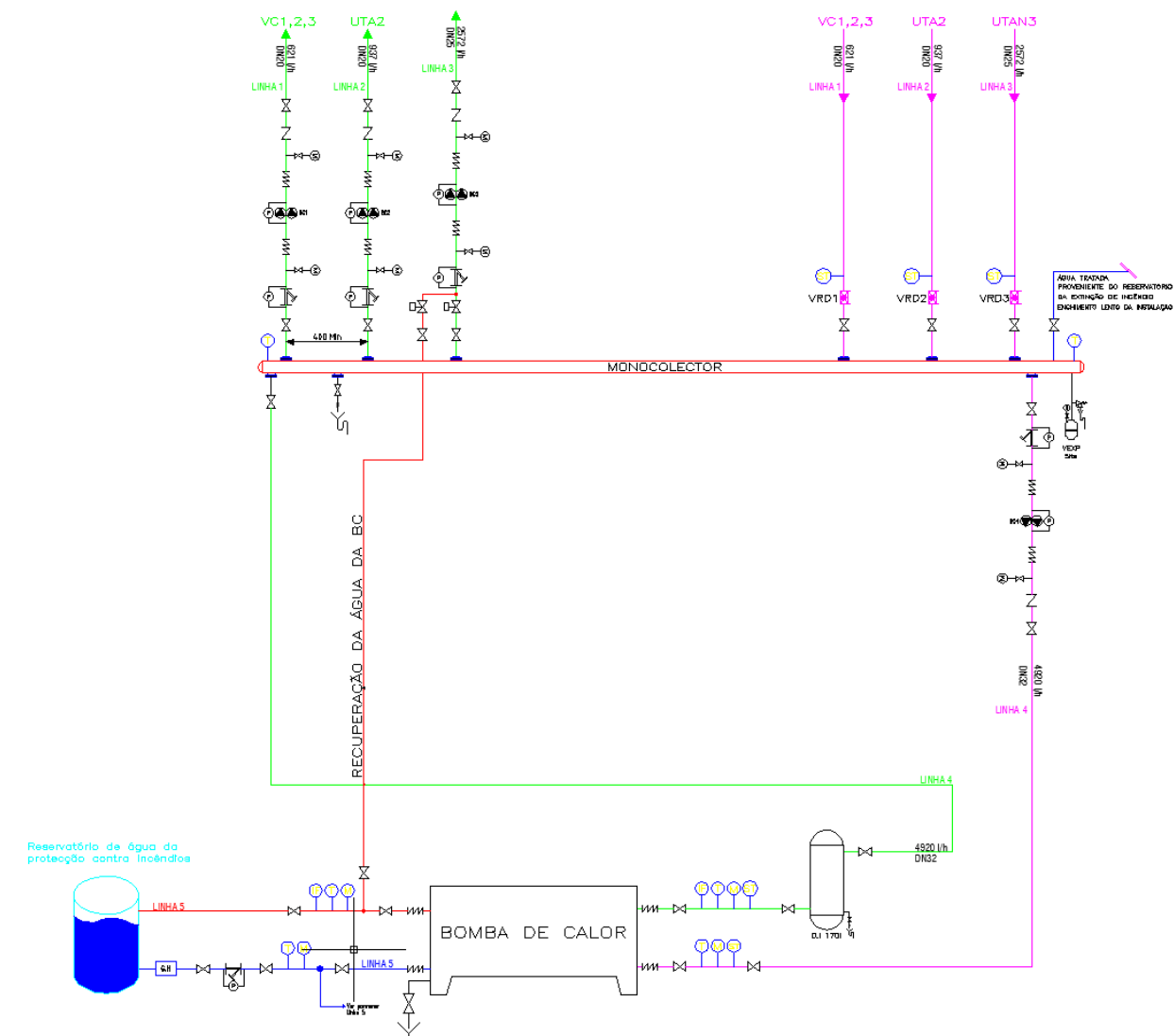


Figura C6 – Esquema hidráulico do sistema base de AVAC

C10 – Esquema de princípio do sistema AVAC otimizado

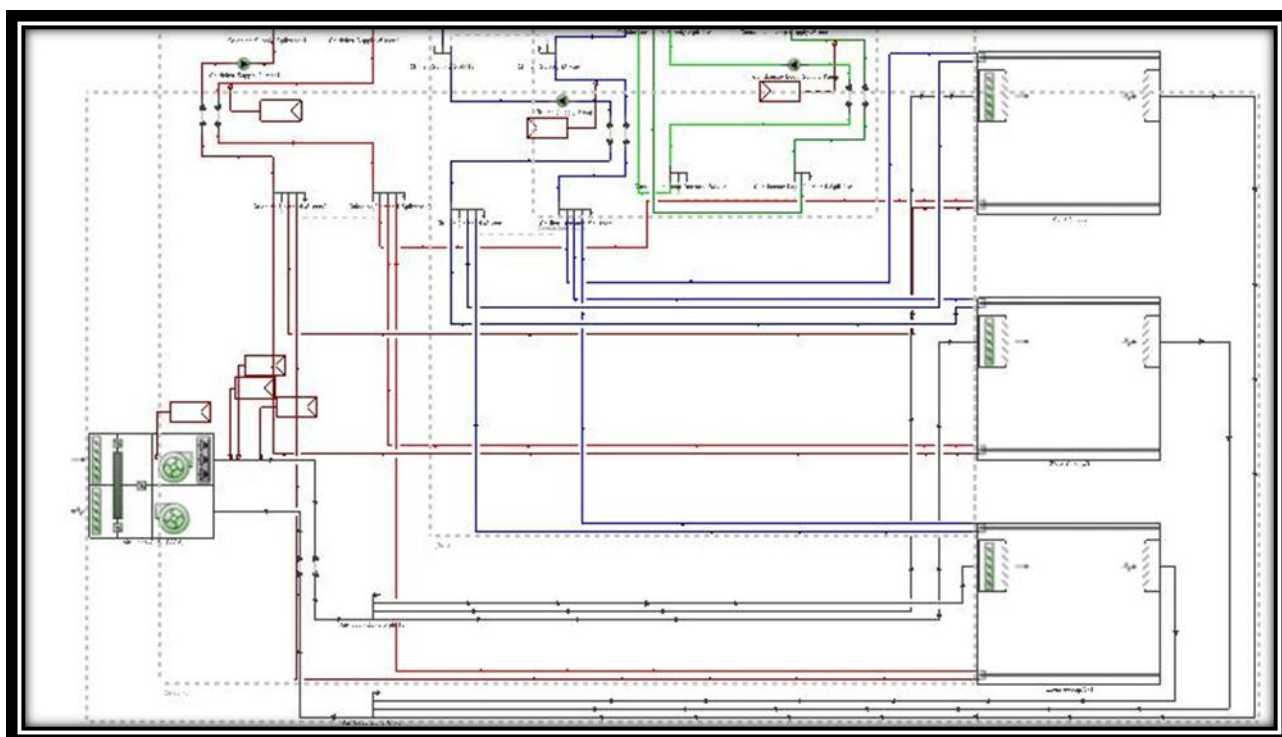


Figura C7 – Esquema de princípio do sistema otimizado (s/bateria de arrefecimento incorporada) –
[Software: *Design Builder*, módulo: “*HVAC Detailed*”]

C11 – Esquema princípio do sistema “Green System”

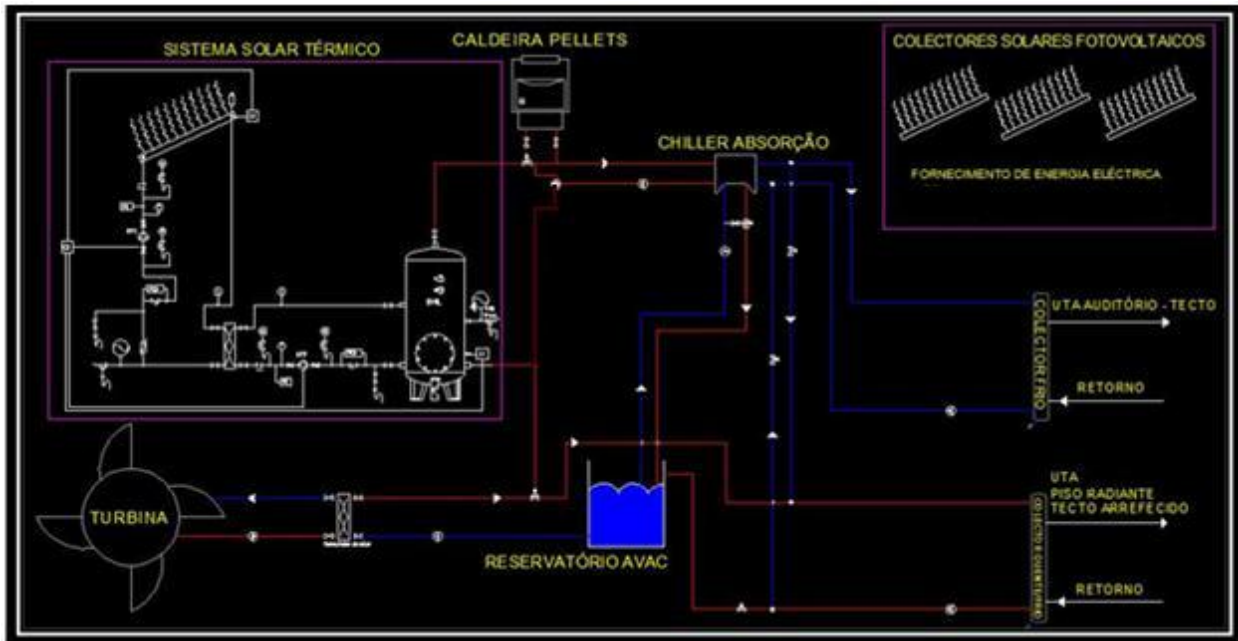


Figura C8 – Esquema de princípio do sistema “Green System”

Anexo D. Equipamentos

D1 – Caldeira a pellets – Green System

		LP20
Dimensioni – Dimensions – Dimensiones – Masse – Dimensiones • l x h x p (mm)		525x1368x941
Peso netto – Poids net – Net weight – Nettogewicht – Peso neto • (kg)		260
Diametro scarico fumi – Diamètre sortie de fumées – Smoke outlet diameter – Rauchrohrdurchmesser – Dimensión salida humo • Ø • (mm)		120
Potenza termica globale – Puissance thermique globale – Global thermal power – Gesamte Wärmeleistung – Potencia térmica total • (kW)		4,2-22,3
Potenza nominale (utile) – Puissance nominale utile – Nominal thermal power – Nennwärmeleistung – Potencia nominal útil • (kW)		3,9-20,9
Contenuto fluido scambiatore – Liquide contenu dans l'échangeur – Fluid contents of the exchanger – Gehalt Flüssigkeit im Austauscher – Contenido fluido intercambiador • H ₂ O (l)		32
Pressione d'esercizio – Puissance d'exercice – Working pressure – Arbeitsdruck – Presión de trabajo • Max (bar)		2,5
Allacciamento caldaia – Connection chaudière – Boiler connection – Kesselanschluss – Conexión de la caldera • Ø		1"
Aria primaria regolabile – Air primaire réglable – Adjustable primary air – Verstellbare Primärluft – Aire primario regulable		Fissa
Aria secondaria regolabile – Air secondaire réglable – Adjustable secondary air – Verstellbare Sekundärluft – Aire secundario regulable		Pretratarata
Rendimento – Rendement – Efficiency – Wirkungsgrad – Rendimiento • (%)		>93
Consumo orario – Consommation – Hourly consumption – Stundenverbrauch – Consumo horario • (kg/h)		0,9-4,6
Canna fumaria – Tuyau de cheminée – Chimney – Schornsteinrohr – Conducto de humos		
Tragggio – Tirage – Draught – Abzug – Tiro • mm H ₂ O		-1
Preso aria esterna – Prise d'air extérie – Outer air inlet – Außenlufteintritt – Toma de aire exterior • Ø (mm)		100
Capacità totale serbatoio – Capacité totale réservoir – Feed box total capacity – Tank-Gesamtkapazität – Capacidad total depósito • (kg)		-70
Assorbimento elettrico – Absorption électrique – Electric consumption – Stromaufnahme – Consumo eléctrico • (W)		150-180
Assorbimento elettrico in accensione – Absorption électrique pendant l'allumage – Ignition electric consumption – Zündung Stromaufnahme – Consumo eléctrico durante el encendido • (W)		+400
Combustibile di riferimento per dati prova – Combustible de référence pour données d'essai – Fuel of reference for test data – Referenz-brennstoff für Prüfdaten – Combustible de referencia para datos de prueba		Pellet ONORM M7135 DIN PLUS
Diametro tubo scarico automatico – Diamètre tuyau évacuation automatique – Automatic discharge pipe diameter – Rohrdurchmesser automatischer Auslass – Diámetro del tubo de desague automático • Ø		1/2"
Diametro tubo aspirazione aria – Diamètre tuyau d'aspiration d'air – Air intake pipe diameter – Rauchsaugrohr Auslass – Diámetro del tubo de aspiración del aire – A • (mm)		60
Prevalenza pompa – Prévalence pompe – Pump head – Förderhöhe Pumpe – Altura total de elevación de la bomba • (m)		5
Termostato interno – Thermostat intérieur – Internal thermostat – Innere Thermostat – Termostato interno		NO
Predisposizione per termostato esterno – Prédiposition pour thermostat extérieur – Foreseen for external thermostat – Vorgehen für ausseren Thermostat – Posibilidad de conexión de termostato externo/Termostato sicurezza – Thermostat de		SI
Termostato sicurezza – Thermostat de sécurité – Over heating Thermostat – Sicherheitsthermostat – Termostato seguridad		SI
Programmatore Settimanale – Programmeur de semaine – Week programmer – Wochenprogrammierer – Programador semanal		SI
Accensione elettrica – Allumage électrique – Electric ignition – Elektrische Zündung – Encendido eléctrico		SI
Pompa di circolazione – Pompe de circulation – Circulation pump – Umwälzpumpe – Bomba de circulación		SI
Vaso di espansione – Vase d'expansion – Expansion tank – Ausdehnungsgefäß – Vaso de expansión		SI

Figura D1 – Características técnicas da caldeira a pellets

D2 – Chiller de Absorção – “Green System”

WFC-SC5

Specifications:

Water Fired Chiller absorption type with H₂O/LiBr

System functionality provides cooling

Utilizing Hot Water



ITEM		MODEL		WFC-SC5
Cooling Capacity				kW
				17.6
Heating Capacity				kW
				-
Chilled Water and Hot Water	Chilled Water Temperature	Inlet	°C	12.5
		Outlet	°C	7.0
	Hot Water Temperature	Inlet	°C	-
		Outlet	°C	-
	Evaporator Pressure Loss(Max) *3		kPa	52.6
	Max Operating Pressure		kPa	588
	Rated Water Flow		L/sec	0.77
			m ³ /hr	2.77
Water Retention Volume		L	8	
Cooling Water	Heat Rejection		kW	42.7
	Cooling Water Temperature	Inlet	°C	31.0
		Outlet	°C	35.0
	Abs.&Cond.Pressure Loss(Max) *3		kPa	38.3
	Max Operating Pressure		kPa	588
	Rated Water Flow		L/sec	2.55
			m ³ /hr	9.18
Water Retention Volume		L	37	
Heat Medium	Heat Input		kW	25.1
	Heat Medium Temperature	Inlet	°C	88
		Outlet	°C	83
	Inlet Limit		°C	70 - 95
	Generator. Pressure Loss(Max) *3		kPa	77.0
	Max Operating Pressure		kPa	588
	Rated Water Flow		L/sec	1.2
			m ³ /hr	4.32
Water Retention Volume		L	10	

Figura D2 – Características técnicas do chiller de absorção

Anexo E. Mapa Daylighting

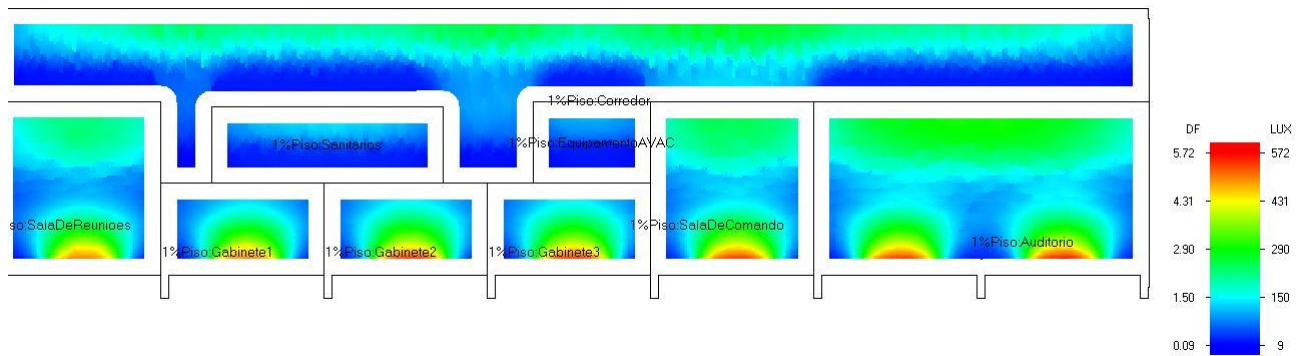


Figura E1 – “Mapa Daylighting” do 1º piso com a introdução de dispositivos que promovam a entrada de luz solar

Anexo F. CFD

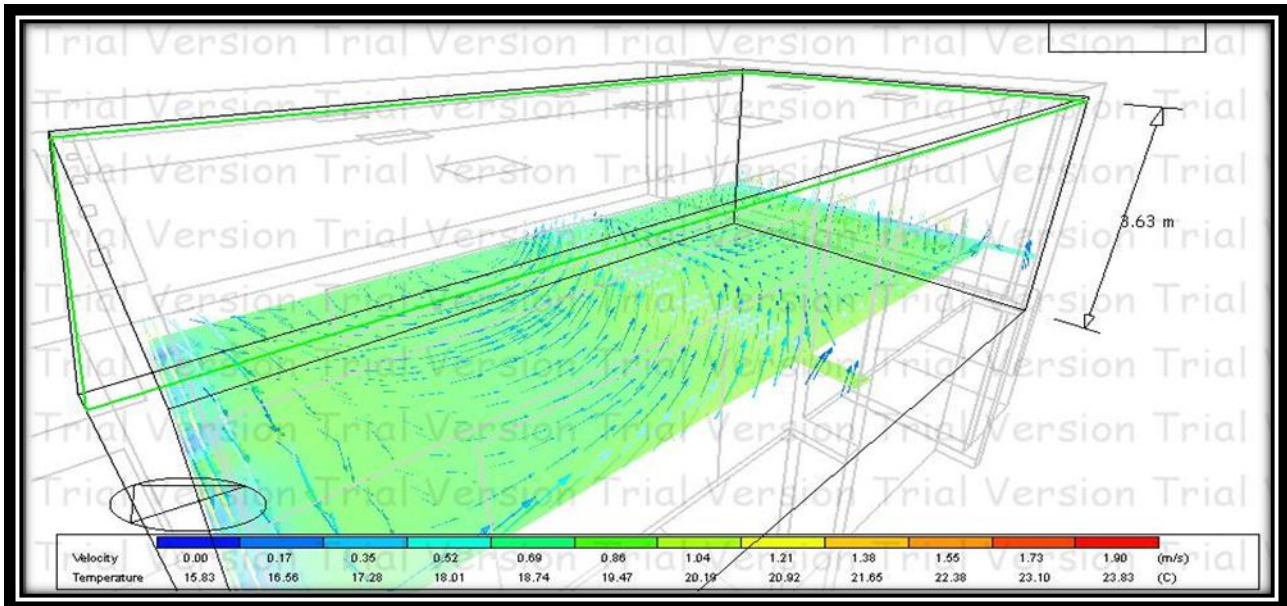


Figura F1 – Distribuição da temperatura interior a 1,5 m do pavimento utilizando piso radiante e grelhas para introdução do ar novo pelo tecto e extracção do mesmo através de uma “sanca” – Software: DesignBuilder – “Módulo CFD”.

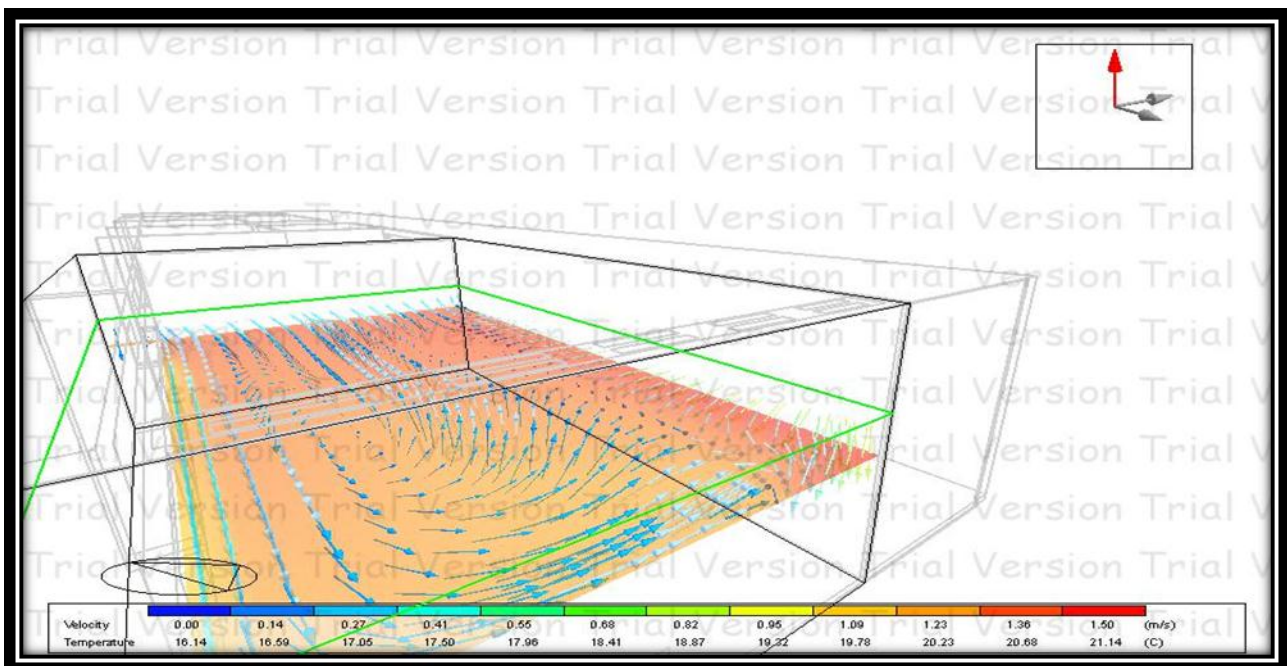


Figura F2 – Distribuição da temperatura interior a 1,5 m do pavimento utilizando grelhas de insuflação e extracção de ar colocadas no tecto e posicionadas nas extremidades do mesmo – Software: DesignBuilder – “Módulo CFD”.