



VITOR
MIGUEL
FREIRE
GAMEIRO
BIBE

**ESTUDO DA OTIMIZAÇÃO
ENERGÉTICA PARA CONFORTO
AMBIENTE COM TECNOLOGIAS
PASSIVAS E ATIVAS NUM ECO
RESORT SITUADO NA ARABIA
SAUDITA**

Relatório de Projeto do Mestrado em Engenharia
e Gestão da Energia na Indústria e Edifícios

ORIENTADOR

Professor Especialista, José Vaz Afonso

Setembro de 2023

VITOR MIGUEL
FREIRE GAMEIRO
BIBE

**ESTUDO DA OTIMIZAÇÃO
ENERGÉTICA PARA CONFORTO
AMBIENTE COM TECNOLOGIAS
PASSIVAS E ATIVAS NUM ECO
RESORT SITUADO NA ARABIA
SAUDITA**

JÚRI

Presidente: Professor Doutor, Paulo Miguel Marques
Fontes, Escola Superior de Tecnologia de Setúbal

Orientador: Professor Especialista, José Vaz
Afonso, Escola Superior de Tecnologia de Setúbal

Vogal: Professor Doutor, João Francisco dos Santos
Fernandes, Escola Superior de Tecnologia de Setúbal

Setembro de 2023

*À minha querida ida avó,
meu porto de abrigo,
e à minha mulher que
esteve sempre a meu lado.*

página deixada propositadamente em branco

Agradecimentos

A concretização deste projeto final nunca teria sido efetivada sem o contributo e influência de muitas pessoas que, de uma forma ou outra, se cruzaram no meu caminho e que gostaria de manifestar a minha gratidão.

Em primeiro lugar gostaria de destacar as duas pessoas que mais me apoiaram neste caminho, em que uma delas já não poderá ver fisicamente o resultado, mas sei que está a olhar por mim, a minha avó Suzete, e a minha mulher Paula Pires que sempre me apoiou e fez-me caminhar, nos momentos mais difíceis.

Um agradecimento especial também ao meu orientador Professor José Afonso, pela possibilidade de poder participar num projeto internacional e pelos conhecimentos transmitidos ao longo deste período, contribuindo para o meu enriquecimento pessoal e profissional.

Quero agradecer aos meus colegas de mestrado, com especial destaque aos meus colegas e companheiros José Luz e Rosário Paquete que fizeram parte da maioria dos projetos ao longo deste mestrado e que me transmitiram para além do conhecimento, o companheirismo.

Um agradecimento ainda a todos os professores do Mestrado em Engenharia e Gestão da Energia pelo conhecimento transmitido, que tornou possível a elaboração deste projeto.

Resumo

Pretendeu-se com este trabalho, promover o estudo da otimização energética para conforto ambiente com tecnologias passivas e ativas num eco resort situado na Arabia Saudita.

Não existindo infraestruturas de distribuição de energia elétrica, é necessário otimizar o consumo de energia. A modelação do edifício foi feita com o *software Design Builder*, criando um modelo que reproduza as mesmas condições que se pretendem ser analisadas, que cumpre com a metodologia de cálculo da norma *ASHRAE 140*. Ao longo deste trabalho foram modeladas 4 soluções construtivas, 13 técnicas de arrefecimento passivo isoladas e 3 de forma combinada e 5 sistemas de climatização.

Abordaram-se os códigos locais *Saudi Building Code (SBC)* e os seus cadernos acessórios, *SBC 501 (Energy Conservation Requirements)* e o *SBC 601 (Mechanical Requirements)*. Por último fez-se uma abordagem comparativa destes requisitos com as recomendações da *ASHRAE 90.1*, *ASHRAE 55-2010* e na *ASHRAE 62.1*

Palavras chave:

Arrefecimento passivo, consumo de energia, arrefecimento evaporativo, conforto térmico, inércia térmica, Ar Novo, AVAC

Abstract

The aim of this work was to promote the study of energy optimization for environmental comfort with passive and active technologies in an *eco resort* located in Saudi Arabia.

Since there is no electricity distribution infrastructure, it is necessary to optimize energy consumption. The modeling of the building was done with the Design Builder software, creating a model that reproduces the same conditions that are intended to be maintained, which follow the calculation methodology of the ASHRAE 140 standard. Throughout this work 4 constructive solutions were modelled, 16 passive cooling techniques on isolated and combined form, and 5 air conditioning systems.

The local codes Saudi Building Code (SBC) and its cartoon notebooks, SBC 501 (Energy Conservation Requirements) and SBC 601 (Mechanical Requirements) were addressed. Subsequently, a comparison was made between these requirements and the recommendations of ASHRAE 90.1, ASHRAE 55-2010 and ASHRAE 62.1

Keywords:

Passive cooling, energy consumption, evaporative cooling, thermal comfort, thermal inertia, Outdoor Air, HVAC

Índice

Agradecimentos	V
Resumo.....	vi
Abstract.....	vii
Índice	viii
Lista de Tabelas	x
Lista de Figuras	xii
Lista de Siglas e Acrónimos	xiv
Lista de unidades.....	xv
Capítulo 1 Introdução	1
1.1 Enquadramento energético global.....	1
1.2 Enquadramento energético local	2
1.3 Objetivos e metodologia	4
1.4 Conteúdo	4
Capítulo 2 Estado da Arte.....	6
2.1 Técnicas de arrefecimento	6
2.1.1 Técnicas de arrefecimento passivos	6
2.1.2 Categorização das técnicas de arrefecimento passivo	6
2.1.3 Técnicas de arrefecimento passivo usados em climas quentes e secos.....	11
2.2 Sistemas ativos.....	12
2.2.1 Classificação de sistemas ativos	12
2.2.2 Centrais térmicas (arrefecimento)	13
2.3 Geotermia	15
2.4 Simulação energética	17
2.4.1 Descrição das aplicações do programa <i>Design Builder</i>	18
2.4.2 Introdução de dados	18
2.4.3 Dimensionamento potências de projeto para arrefecimento (<i>Cooling Design</i>)	20
2.4.4 Consumos energéticos (<i>Simulations</i>)	21
Capítulo 3 Enquadramento técnico e normativo	22
3.1 Envolvente térmica	22
3.1.1 Requisitos da envolvente térmica (SBC).....	24
3.1.2 Requisitos da envolvente térmica (ASHRAE 90.1)	28
3.1.3 Comparativo de requisitos da envolvente térmica (SBC vs. ASHRAE 90.1)	30
3.2 Inércia térmica	31
3.3 Cargas térmicas.....	31
3.4 Conforto térmico	32
3.5 Qualidade do Ar Interior.....	35
3.5.1 Requisitos mínimos de Ar Novo (SBC)	36
3.5.2 Requisitos de caudais mínimos de Ar Novo (ASHRAE)	38
3.5.3 Comparativo de requisitos (SBC / ASHRAE)	39
Capítulo 4 Caso de estudo, Edifício tipo – Hotel.....	40

4.1. Localização	40
4.2. Descrição	41
4.3. Pressupostos	42
4.4. Etapas da simulação	42
4.5. Dados de projeto.....	44
4.5.1. Dados climáticos e psicrométricos	44
4.6. Modelação do edifício	46
4.6.1. Geometria do edifício	46
4.6.2. Temperaturas de Setpoint e Setback	48
4.6.3. Ganhos de calor (de origem interna)	49
4.6.4. Perfis	52
4.7. Soluções construtivas	54
4.8. Técnicas de arrefecimento passivo	57
4.9. Sistemas de arrefecimento ativos.....	59
Capítulo 5 Apresentação de resultados	69
5.1. Solução construtiva.....	69
5.2. Impacto das medidas de arrefecimento passivo nas potências de projeto.....	72
5.3. Impacto das medidas de arrefecimento passivo nos consumos de energia.....	75
5.4. Eficiência energética de sistemas climatização ativos	77
5.5. Comparativo de soluções SBC vs ASHRAE	81
Capítulo 6 Conclusão	83
6.1. Sumário.....	83
6.2. Conclusões gerais	83
6.3. Projetos futuros.....	84
Bibliografia	85

Lista de Tabelas

Tabela 1.1 - Dados sobre de energia elétrica na Arábia Saudita em 2016.	2
Tabela 2.1 - Coeficiente da absorção solar.	8
Tabela 3.1 - Resistências térmicas superficiais	23
Tabela 3.2 - Solução construtiva do elemento.	24
Tabela 3.3 - Resistência térmica superficial do elemento construtivo (interior e exterior).	24
Tabela 3.4 - Espessura, resistência térmica total e coeficiente de transmissão térmica.	24
Tabela 3.5 - Estações meteorológicas do Reino da Arábia Saudita e os seus Graus-dia.	26
Tabela 3.6 - Relação dos WWR com os requisitos da envolvente térmica	27
Tabela 3.7 - Valores da envolvente térmica para WWR de 20%.	27
Tabela 3.8 - Dados climáticos para Riade, Arábia Saudita.	28
Tabela 3.9 - Definição das zonas climáticas internacionais.	30
Tabela 3.10 - Valores máximos admissíveis de Coeficientes de transmissão térmica (U/W.K).	30
Tabela 3.11 - Escala de sensação térmica do modelo de Fanger.	33
Tabela 3.12 - Eficiência da distribuição de ar.	37
Tabela 3.13 - Caudais mínimos de ar novo dos espaços interiores de hotel, com base no SBC.	37
Tabela 3.14 - Caudais mínimos de Ar Novo dos espaços interiores de hotel, com base na ASHRAE.	38
Tabela 3.15 - Quadro comparativo de caudais de Ar Novo das normas SBC e ASHRAE .	39
Tabela 4.1 - Dados de projeto.	45
Tabela 4.2 - Espaços interiores do edifício hotel.	47
Tabela 4.3 - Agrupamento de espaços com as mesmas características	47
Tabela 4.4 - Temperaturas de <i>setpoint</i> e <i>setback</i> .	48
Tabela 4.5 - Ganhos de calor internos receção e escritório.	49
Tabela 4.6 - Ganhos de calor internos Restaurante + Lounge + Lounge e Kitchenette pessoal.	49
Tabela 4.7 - Ganhos de calor internos Quarto (hóspedes).	50
Tabela 4.8 - Ganhos de calor internos Ginásio.	50
Tabela 4.9 - Ganhos de calor internos Cozinha.	50
Tabela 4.10 - Ganhos de calor internos Armazém.	51
Tabela 4.11 - Ganhos de calor internos Lavandaria.	51
Tabela 4.12 - Resumo ganhos de calor internos espaços Hotel. de acordo com SBC e ASHRAE.	51
Tabela 4.13 - Dados envolvente térmica de acordo com as normas SBC 601 e ASHRAE 90.1.	54
Tabela 4.14 - Quadro resumo das soluções construtivas.	55
Tabela 4.15 - Quadro resumo da inércia térmica das soluções construtivas.	56
Tabela 4.16 - Resumo das massas totais.	56
Tabela 4.17 - Técnicas de arrefecimento passivo utilizadas na simulação.	57
Tabela 4.18 - Dados técnicos Sistema 1.	60
Tabela 4.19 - Dados técnicos Sistema 2.	61
Tabela 4.20 - Dados técnicos Sistema 3.	63
Tabela 4.21 - Dados técnicos Sistema 4.	65
Tabela 4.22 - Dados técnicos Sistema 5.	67
Tabela 4.23 - Quadro resumo dos sistemas a utilizar nas simulações para este projeto.	68
Tabela 5.1 - Dia com maior carga térmica no interior do edifício (15/06 - 14:00)	69
Tabela 5.2 - Potências de projeto para arrefecimento (soluções construtivas em teste).	70
Tabela 5.3 - Resultado dos consumos de energia final das soluções construtivas.	71
Tabela 5.4 - Emissão de Gases com Efeito de Estufa das soluções construtivas.	71
Tabela 5.5 - Potência de projeto de arrefecimento recorrendo a técnicas de arrefecimento passivo de forma isolada	72
Tabela 5.6 - Potência de projeto de arrefecimento recorrendo a técnicas de arrefecimento passivo de forma combinada.	73
Tabela 5.7 - Impacto das medidas de arrefecimento passivo nos consumos energéticos.	75
Tabela 5.8 - Emissões de gases com efeito de estufa com técnicas de arrefecimento passivo.	76
Tabela 5.9 - Consumos de energia dos sistemas de climatização.	77
Tabela 5.10 - Emissões de GEE dos sistemas ativos (SBC).	78
Tabela 5.11 - Desagregação de consumos de energia final.	79
Tabela 5.12 – EER sistemas arrefecimento (dia 15/06, 24 horas).	80
Tabela 5.13 - Dados arrefecimento evaporativo.	81
Tabela 5.14 - Comparativo de soluções com requisitos SBC e ASHRAE.	81

Tabela 5.15 - Emissões de gee do comparativo do Sistema 5 com requisitos SBC e ASHRAE.	82
Tabela 5.16 – Quadro resumo dos consumos energéticos dos sistemas e de desconforto dos ocupantes.	82

Lista de Figuras

Figura 1.1 - Participação na capacidade instalada anual, 2001-2020.	1
Figura 1.2 - Energia primária total fornecida na Arábia Saudita em 2018.	3
Figura 1.3 - a) Desagregação das fontes de energia primária fornecida, de origem renovável, em 2018. b) Evolução da capacidade de geração de energia elétrica com fonte renovável.....	3
Figura 2.1 - Exemplos de montagens de vegetação em edifícios exterior e interior. a) <i>greenroof</i> , b) <i>greenwalls</i> , c) <i>indoor sky garden</i> (jardim interior)	7
Figura 2.2 - Dispositivos de proteção solar fixos. a) Palas horizontais, b) Palas verticais, c) Louvres (Persiana)	8
Figura 2.3 - Arrefecimento evaporativo direto e indireto.	11
Figura 2.4 - Exemplo de funcionamento de bomba de calor. (esq. - modo arrefecimento, dta. – modo aquecimento)	15
Figura 2.5 - Sistema geotérmico de uso direto.	16
Figura 2.6 - Sistema geotérmico profundo.	17
Figura 2.7 - Hierarquia do programa <i>design builder</i>	18
Figura 2.8 - Separador de cima, no menu principal <i>design builder</i>	18
Figura 2.9 - Interface da ferramenta <i>model data grid management</i>	19
Figura 2.10 - Exemplo do conteúdo <i>Openings > External glazing</i>	19
Figura 2.11 - Separador de baixo, no menu principal <i>Design Builder</i>	20
Figura 2.12 - Inserção de dados em <i>Simulation</i>	21
Figura 3.1 - Envolvente térmica do edifício.	22
Figura 3.2 - Temperatura média para Riade, limite superior HDD18 e limite inferior CDD18.	26
Figura 3.3 - Temperatura média para Riade, limite superior HDD65 (azul) e limite inferior CDD50 (laranja). ...	28
Figura 3.4 - Efeitos da inércia térmica.	31
Figura 3.5 - Perfil de ocupação / utilização para o espaço Cozinha.	32
Figura 3.6 - Percentagem de insatisfeitos prevista em função da votação média prevista.	34
Figura 3.7 - Método gráfico da zona de conforto.	34
Figura 3.8 - Faixa aceitável de temperatura operativa e velocidades do ar para a zona de conforto.....	35
Figura 3.9 - Unidade de tratamento de ar.	36
Figura 3.10 - Requisitos de caudais de Ar Novo.	36
Figura 3.11 - Requisitos mínimos de insuflação de Ar Novo.	38
Figura 4.1 - Localização Riade, Arábia Saudita.	40
Figura 4.2 - Temperaturas anuais exteriores de bolbo seco para Riade, Arábia Saudita.....	40
Figura 4.3 - <i>Eco resort</i>	41
Figura 4.4 - Dados climáticos de Riade, Arábia Saudita.....	44
Figura 4.5 - Vistas do espaço tipo, Hotel.	46
Figura 4.6 - Perfil Lounge, Restaurante, Lounge e Kitchenette pessoal.....	52
Figura 4.7 - Perfil Recepção + Escritório	52
Figura 4.8 – Perfil Cozinha.....	53
Figura 4.9 - Perfil Ginásio.....	53
Figura 4.10 – Perfil lavandaria.	53
Figura 4.11 - Sistema ar-água com <i>Chiller</i> , arrefecido a ar.	60
Figura 4.12 - Sistema ar-água com <i>Chiller</i> , arrefecido a água com permutador de calor geotérmico.....	61
Figura 4.13 - Dados geotérmicos (permutador de calor).	62
Figura 4.14 - Sistema de distribuição de ar DX (expansão direta), com equipamento VRF arrefecido a ar.	63
Figura 4.15 - Sistema de distribuição de ar DX (expansão direta), com equipamento VRF arrefecido a água com permutador de calor geotérmico.	64
Figura 4.16 - Dados geotérmicos (permutador de calor).	65
Figura 4.17 - Sistema de distribuição de ar arrefecimento evaporativo indireto, com unidades interiores e exterior VRF, arrefecido a água com permutador de calor geotérmico.	66
Figura 4.18 - Dados do bloco de arrefecimento evaporativo indireto.....	67
Figura 5.1 - Introdução de dados em <i>Cooling Design</i>	69
Figura 5.2 - Potências de projeto para arrefecimento por solução construtiva.	70
Figura 5.3 - Potência de projeto para arrefecimento de acordo com as técnicas de arrefecimento passivo de forma isolada.	72
Figura 5.4 - Potência de projeto de arrefecimento com técnicas de arrefecimento passivo de forma isolada e combinada (hotel).	74
Figura 5.5 - Consumos de energia final sobre as estratégias de arrefecimento passivo.....	76

Figura 5.6 - Consumos anuais dos sistemas de climatização (kWh.m2.ano).....	78
Figura 5.7 - Consumos anuais de sistemas de climatização (kWh.ano).....	78
Figura 5.8 - Análise de eficiência dos sistemas para dia 15/06.	80

Lista de Siglas e Acrónimos

ASHRAE	<i>American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers</i> (Sociedade Americana de Engenheiros de Aquecimento, Refrigeração e Ar Condicionado)
AVAC	Aquecimento Ventilação e Ar Condicionado
CAV	<i>Constant Air Volume</i> (Volume de Ar Constante)
CDD	<i>Cooling Degree Days</i> (Graus Dia para Arrefecimento)
DD	<i>Degree Days</i> (Graus Dia)
DX	<i>Direct Expansion</i> (Expansão Direta)
EER	<i>Energy Efficiency Ratio</i> (Rácio de Eficiência Energética)
FCU	<i>Fan Coil Unit</i> (Ventilo convetores)
GEE	Gases com Efeito de Estufa
HDD	<i>Heating Degree Days</i> (Graus Dia para Arrefecimento)
HTML	<i>Hypertext Markup Language</i> (Linguagem de Marcação de Hipertexto)
IRENA	<i>International Renewable Energy Agency</i> (Agência Internacional para a Energia Renovável)
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
PCM	<i>Phase Change Materials</i> (Materiais com Mudança de Fase)
PMV	<i>Predicted Mean Vote</i> (Voto Médio Previsto)
PPD	<i>Predicted People Dissatisfied</i> (Previsão de Pessoas Insatisfeitas)
R _{se}	Resistência térmica superficial exterior
R _{si}	Resistência térmica superficial interior
R _t	Resistência total
SBC	<i>Saudi Building Code</i> (Código de Construção Saudita)
SHGC	<i>Solar Heat Gain Coefficient</i> (Coeficiente de ganho de calor solar)
VAV	<i>Variable Air Volume</i> (Volume de Ar Variável)
VRF	<i>Variable Refrigerant Flow</i> (Caudal Refrigerante Variável)
UTA	Unidade de Tratamento de Ar
UTAN	Unidade de Tratamento de Ar Novo
WWR	<i>Window to Wall Ratio</i> (Relação Envidraçado - Parede)

Lista de unidades

$^{\circ}\text{C}$	Grau Celsius
CO_{2e}	Dióxido de carbono equivalente
h	Hora
J	Joule
F	Fahrenheit
K	Kelvin
kg	Quilograma
t	Tonelada ($1 \times 10^3 \text{ kg}$)
l	Litros
kWh	Quilowatt-hora
MWh	Megawatt-hora ($1 \times 10^3 \text{ kWh}$)
$kWhEP$	Quilowatt-hora Energia Primária
$MWhEP$	Megawatt -hora Energia Primária ($1 \times 10^3 \text{ kWhEP}$)
m	Metro
m^2	Metro quadrado
m^3	Metro cúbico
mm	Milímetro ($1 \times 10^{-3} \text{ m}$)
s	Segundo
W	Watt

Capítulo 1

Introdução

1.1 Enquadramento energético global

Na conjuntura atual, os assuntos em torno das alterações climáticas, emissões de Gases com Efeito de Estufa (GEE), as suas causas e consequências, são incontornáveis.

De acordo com o documento “Perspetiva de transição energética mundial – Caminho para 1,5°C” [1] publicado pela IRENA¹, a meta para a redução das emissões de GEE desde 2010 até 2030 deveria ser de 45%, e já existe um desvio entre o momento que estamos, e onde deveríamos estar, e que tem vindo a ser alargado.

Contudo, existem diversas tendências que apontam o caminho para a transição energética sendo que a redução dos custos das tecnologias renováveis ao ponto de a eletricidade com origem em combustíveis fósseis já não ser atraente, a oferta crescente do *mix* energético baseado em fontes renováveis, e, por último, a transição energética baseada em fontes de energia renovável aliada a tecnologias mais eficientes.

A Figura 1.1 mostra a realidade do setor da energia elétrica mundial, de 2001-2021.

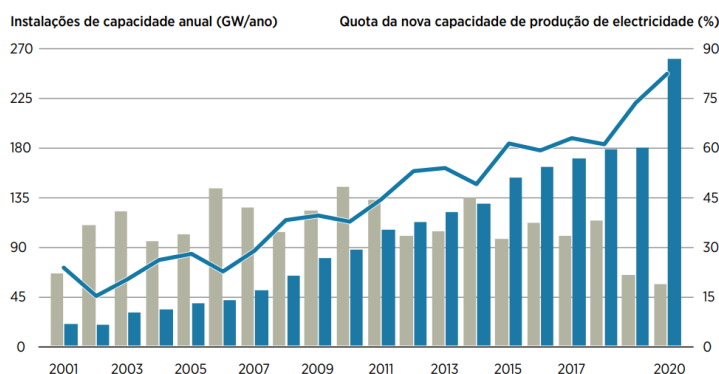


Figura 1.1 - Participação na capacidade instalada anual, 2001-2020. (Fonte: IRENA)

Observa-se que, apenas no ano de 2002 houve um retrocesso da capacidade instalada de energias renováveis que, no entanto, desde 2003 tem vindo a crescer, com um forte impacto no ano de 2020 onde o seu crescimento foi de cerca de 31% face ao ano anterior, colocando para este ano a quota de energias renováveis nos 80%.

¹ IRENA – *International Renewable Energy Agency* (Agência Internacional para as Energias Renováveis)

Com a procura crescente pelo conforto e o baixo desempenho térmico dos edifícios em diversas regiões do mundo, a aquisição de sistemas climatização é a opção mais procurada, elevando o consumo de energia nos sectores residencial e de comércio e serviços, e consequentemente os gases com efeito de estufa.

De acordo com literatura consultada, cerca de 60% do consumo de energia de um edifício provém dos sistemas de aquecimento, ventilação e ar condicionado (AVAC) [2]. A necessidade de encontrar estratégias e soluções que permitam uma maior eficiência energética dos edifícios, está diretamente relacionado com a minimização dos valores de consumo destes sistemas.

É imprescindível também, encontrar estratégias e soluções de construção que permitam a otimização energética. Assim, os governos e organizações têm vindo a implementar respostas a estes problemas através de legislação e regulação na construção e de conservação da energia local para os edifícios, garantindo diretrizes que os torna mais eficientes.

1.2. Enquadramento energético local

O Reinado da Arábia Saudita é considerado um dos maiores poluidores do mundo. A procura por energia elétrica está a aumentar rapidamente na Arábia Saudita devido ao crescimento da população e da construção de edifícios, com um aumento de 33% em 5 anos, de 2014 a 2019 [2].

Em 2020, foi lançado o programa *VISION 2030*², um documento que assume diversas linhas orientadoras ao nível estratégico em diversas áreas, sugerindo a diversidade de investimentos económicos focado no desenvolvimento sustentável com o objetivo de reduzir a utilização de sistemas de energia que resultam em emissões de CO₂, e consequentemente a sua dependência do país em relação ao petróleo.

Como mostra a Tabela 1.1, na Arábia Saudita, em 2016, constata-se que os edifícios são os grandes consumidores de energia elétrica, com cerca de 81%, seguindo-se da indústria, e outros, com cerca de 19%.

Tabela 1.1 - Dados sobre de energia elétrica na Arábia Saudita em 2016. (Fonte: Table 1 - IRENA)

TABLE I. ELECTRICITY CONSUMPTION IN SA (2016)

	Annual (10 ³ GWh)	Share in total %	
Residential	144	50.4	80.6
Commercial	47	16.4	
Government	39	13.8	
Industrial	45	15.8	19.4
Others	10	3.7	
Total	286	100	100

² VISION 2030 da Arábia Saudita é uma estrutura estratégica para reduzir a dependência da Arábia Saudita em petróleo, diversificar sua economia e desenvolver setores de serviços públicos, como saúde, educação, infraestrutura, recreação e turismo – Fonte: *VISION 2030*

As estatísticas indicam que do consumo total de energia elétrica, cerca de 60% é utilizada para sistemas de ar condicionado, sendo que em Riade esse valor passa para os 70%. [2]

Para restringir estes valores, a Arábia Saudita regulamentou o sector da construção visando a eficiência energética dos edifícios, em que o seu cumprimento passou a ser obrigatório a partir de 2010, nomeadamente o *Saudi Building Code* (SBC).

De acordo com o relatório sobre o perfil energético da Arábia Saudita, publicado pela IRENA em 2018, o *mix* energético neste país é totalmente não renovável, com uma transformação de energia aproximadamente de 10 000 000 TJ · correspondendo 47% de gás e 53% de petróleo [3], de acordo com a Figura 1.2.

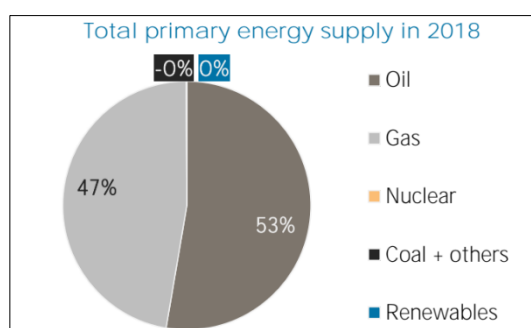


Figura 1.2 - Energia primária total fornecida na Arábia Saudita em 2018. (Fonte: IRENA)

Ainda assim, e apesar dos números terem uma menor expressividade que os anteriores, o fornecimento de energia primária proveniente de fonte renovável tem vindo a aumentar desde 2013.

De acordo com a Figura 1.3, durante os 5 anos seguintes, até 2018 sofreu um crescimento na ordem dos 900%, passando de 434 TJ para 4 377 TJ, com destaque no solar, seguido da bioenergia.

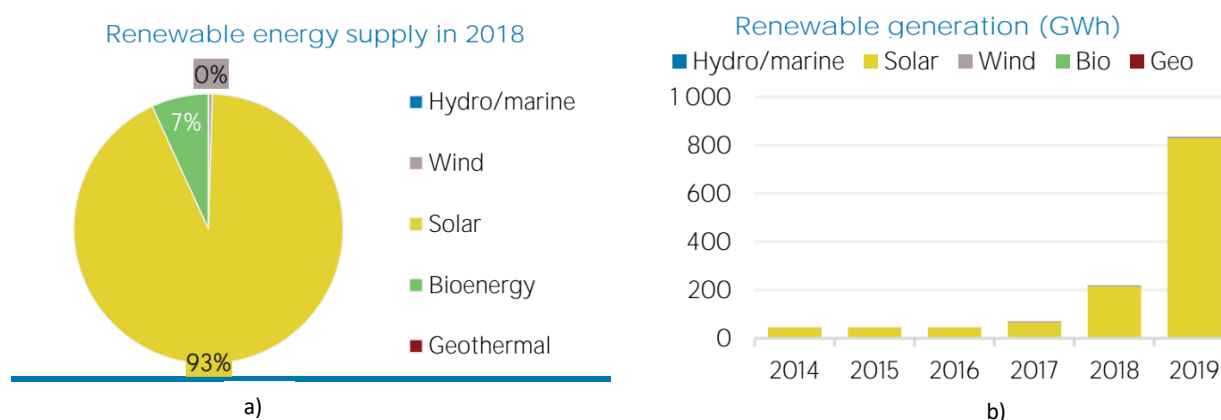


Figura 1.3 - a) Desagregação das fontes de energia primária fornecida, de origem renovável, em 2018.
b) Evolução da capacidade de geração de energia elétrica com fonte renovável (Fonte: IRENA)

1.3. Objetivos e metodologia

O objetivo principal deste projeto é o estudo de otimização energética para conforto ambiente com tecnologias passivas e ativas para um edifício tipo em *eco resort* a construir na Arábia Saudita.

Para o efeito é necessário analisar o impacto da aplicação de técnicas de arrefecimento passivo como forma de mitigação de consumos de energia elétrica em sistemas de arrefecimento ativos. Na verificação dos resultados destes fatores, utilizou-se o software de modelação energética *Design Builder*, recorrendo a um modelo que permita uma aproximação ao real.

Para a concretização do objetivo foram definidas etapas que conduzissem este trabalho ao seu propósito.

Estes objetivos intermédios são:

- Identificação de técnicas de arrefecimento passivo através da literatura selecionada, e associação destas técnicas ao clima da região,
- Elaboração do modelo com base na sua descrição e nos requisitos de acordo com o código local,
- Descrição no plano de simulações,
- Interpretação e análise dos resultados obtidos de cada simulação e posterior análise comparativa entre as simulações,
- Conclusões a retirar da implementação das técnicas de arrefecimento no modelo simulado.

1.4. Conteúdo

Este subcapítulo descreve a estrutura e o conteúdo ao longo do documento. O conteúdo está dividido em 6 capítulos, sendo:

Capítulo 1 – Introdução

Neste capítulo apresenta-se o tema em estudo, o enquadramento energético local. Apresentam-se os objetivos a que se propõe o estudo e a metodologia utilizada. Neste capítulo abrange também a conteúdo do trabalho.

Capítulo 2 – Estado da arte

Neste capítulo identificam-se e caracterizam-se as técnicas de arrefecimento passivo de forma geral e as utilizadas em climas quentes e secos, tendo bibliografia como base. Enumeram-se e descrevem-se os tipos de sistema de arrefecimento ativo e centrais de arrefecimento. É feita uma breve descrição sobre os tipos de geotermia e sua utilização, e, por último descreve-se de forma breve o sistema de simulação energética e a introdução de dados.

Capítulo 3 – Enquadramento técnico e normativo

Este capítulo consiste num enquadramento sobre alguns conceitos que abordam diretamente as temáticas de envolvente térmica do edifício e os seus requisitos perante o código local, inércia térmica, cargas térmicas, conforto térmico e a qualidade do ar interior.

Capítulo 4 – Caso de estudo

O presente capítulo descreve os dados de projeto como a sua localização geográfica, as etapas que o projeto teve desde o início até aos resultados, os dados climáticos locais e a modelação do edifício. Posteriormente, enumeram-se e descrevem-se as fases de simulação que levarão ao modelo final.

Capítulo 5 – Apresentação de Resultados.

Serão apresentados os resultados obtidos pelas diversas simulações realizadas no capítulo anterior. Como técnicas de arrefecimento passivo, verificar-se-á primeiro, o impacto da inércia térmica no dimensionamento de arrefecimento de projeto, e nos consumos de energia durante um período de 4392 horas, de 1 de abril a 30 de setembro. Serão também apresentados o impacto das técnicas passivas adicionais nas necessidades de arrefecimento e nos consumos de energia final.

No âmbito dos sistemas de ativos de arrefecimento, verificar-se-ão os seus consumos de energia final, para obtenção do sistema mais eficiente.

E por último, será apresentado um comparativo nos consumos de energia final, tendo como base a solução mais eficiente, entre requisitos SBC com os requisitos ASHRAE 90.1 (*American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*) [4].

Capítulo 6 – Conclusões

Neste capítulo e último, serão apresentadas as considerações finais sobre o tema em estudo, juntamente com as conclusões que se podem retirar da aplicação das técnicas passivas e ativas de arrefecimento simuladas ao longo deste trabalho. E finalmente, também se proporão alguns desenvolvimentos futuros relacionados com o tema deste projeto.

Capítulo 2

Estado da Arte

2.1 Técnicas de arrefecimento

2.1.1 Técnicas de arrefecimento passivos

Os sistemas de climatização utilizados nos edifícios que visam promover o conforto térmico dos seus ocupantes, são os grandes consumidores de energia elétrica. As técnicas de arrefecimento passivo são uma alternativa à utilização de sistemas de arrefecimento ativo, devendo ser integradas para reduzir consumos de energia.

As escolhas de técnicas de arrefecimento passivo adequadas são dependentes de fatores climáticos, de restrições de espaço e de desempenho da própria técnica passiva, sendo imprescindível que as soluções construtivas dos edifícios tenham em consideração estes fatores como melhoria de desempenho térmico.

As estratégias de arrefecimento passivo para climas quentes e secos, passam pelo controlo solar através da proteção das fachadas através de sombreamento, na redução de ganhos externos de calor através de dispositivos de proteção solar nos vãos envidraçados e no arrefecimento através de ventilação natural quando as condições climáticas assim o permitem [5].

2.1.2 Categorização das técnicas de arrefecimento passivo

De acordo com diversa literatura é possível categorizar as técnicas de arrefecimento passivo em 3 categorias distintas, sendo:

- Proteção dos ganhos de calor,
- Modelação dos ganhos de calor,
- Rejeição de ganhos de calor.

Proteção dos ganhos de calor

O edifício está protegido dos ganhos de calor através da incidência solar direta envolvendo a criação de um microclima recorrendo à organização paisagística, superfícies de água, vegetação e às proteções solares promovendo o sombreamento das superfícies da envolvente opaca e não opaca, classificando-se como proteção baseada em microclima e em métodos de controlo solar.

Microclima

Verifica-se pela variação da temperatura nas imediações dos edifícios proporcionado pelo desenvolvimento paisagístico, pela utilização da vegetação e de superfícies de água.

Desenvolvimento paisagístico da envolvente

Assente na utilização de árvores e vegetação em torno das instalações por forma proporcionar sombreamentos à envolvente térmica do edifício e promover arrefecimento devido ao processo de evapotranspiração³, absorvendo calor.

De acordo com a Figura 2.1, a localização da vegetação poderá ser no exterior e no interior do edifício e existem diversos tipos de montagem como nas coberturas (*greenroofs*), paredes externas (*greenwalls*) ou jardins interiores (*indoor sky garden*). A disponibilidade de água é imprescindível para que seja possível a sua utilização.



Figura 2.1 - Exemplos de montagens de vegetação em edifícios exterior e interior. a) *Greenroof*, b) *Greenwalls*, c) *Indoor sky garden* (jardim interior) (Fonte: a) www.wikipedia.com b) architizer.com c) www.alamy.com)

Superfícies de água

Baseia-se no fenómeno de vaporização de água, através da passagem de ar quente e seco, tornando a superfície mais fria, promovendo o arrefecimento evaporativo. Recorre-se sobretudo à construção de lagos, vaporizadores, piscinas e fontes nas imediações do edifício.

Como exemplo, esta técnica é utilizada em espelhos de água nas coberturas (*roofponds*), em que o mesmo fenómeno tem lugar, sendo popular devido ao seu baixo custo e livre de toxicidade.

A taxa de evaporação calculada com base nas condições climáticas médias de verão pode definir o potencial de resfriamento, e a sua viabilidade depende do fator de existência de água.

Apesar de existirem estudos sobre tipos de plantas que poderão ser inseridas em regiões secas e áridas, não se efetuarão simulações com *greenroofs* devido à falta de água na região, pela baixa precipitação e retenção de água, sendo uma região desértica e pelas dificuldades que o autor encontrou em identificar e determinar os períodos máximos que as plantas sobrevivem neste tipo de clima [6].

³ Evapotranspiração é a perda de água do solo por evaporação e a perda de água da planta por transpiração. (Fonte: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Evapotranspiração>)

Controlo solar

É uma técnica de proteção comumente utilizada controlando a entrada direta da radiação solar no interior das instalações através do correto dimensionamento das aberturas dos vãos envidraçados, das características térmicas dos envidraçados (coeficiente de transmissão térmica, fator solar), ao controlo de dispositivos móveis ou fixos de sombreamento, como palas horizontais (*overhangs*) e/ou verticais (*fins*) ou tipo persiana *louvres*, Figura 2.2.

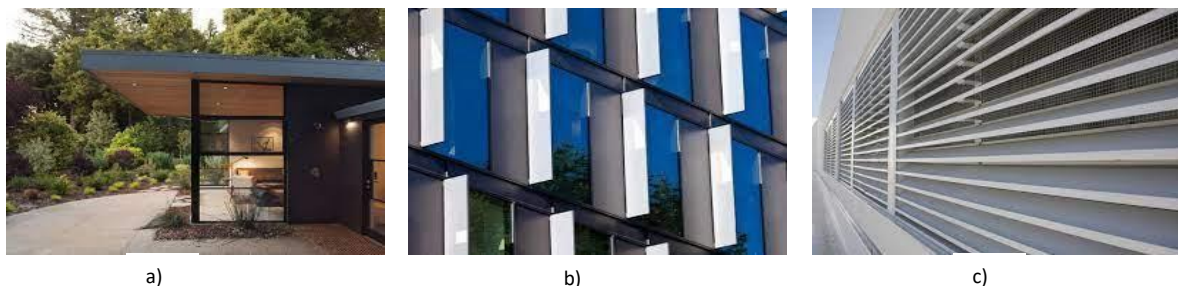


Figura 2.2 - Dispositivos de proteção solar fixos. a) Palas horizontais, b) Palas verticais, c) *Louvres* (Persiana) (Fonte: a www.gardenista.com/posts/the-sheltering-sky-10-ideas-how-to-enhance-your-house-with-a-roof-overhang/ | b) www.indiamart.com/proddetail/aluminium-fins-20311589591.html | c) bossaluminium.com/louvers.html

Como o sombreamento passivo é feito sem recorrer à utilização de energia, o controlo de dispositivos moveis de sombreamento para serem considerados, apenas poderão ser de controlo manual.

Absorção solar

As paredes exteriores e cobertura expostas à radiação solar podem transferir grandes quantidades de calor para um edifício. Como mostra a Tabela 2.1, a superfície da envolvente térmica de um edifício poderá ser composta por diversas cores. Assim, alterando o coeficiente de absorção solar para cores mais claras, provoca o aumento da refletividade solar ou “albedo”⁴, que por sua vez reduz o aquecimento solar, economizando energia final devido à diminuição das necessidades de climatização em climas quentes, em períodos de pico.

Aumentando o albedo do edifício também pode arrefecer o ar exterior, aumentando a economia da energia pela diminuição das temperaturas do ar interior [7].

Tabela 2.1 - Coeficiente da absorção solar. (Fonte: Despacho n.º 6476-H/2021, de 1 de julho)

Cor da superfície	α_{sol}
Cores claras: branco, creme, amarelo, laranja e vermelho-claro	0,4
Cores médias: vermelho-escuro, verde-claro, azul-claro e cinzento-claro	0,5
Cores escuras: castanho, verde-escuro, azul-vivo, azul-escuro e cinzento-escuro	0,8

⁴ **Albedo** ou **coeficiente de reflexão** é a refletividade difusa ou poder de reflexão de uma superfície

Modulação dos ganhos de calor

Esta técnica permite a modulação dos ganhos de calor no edifício recorrendo capacidade de armazenamento térmico da estrutura do edifício. Permite que o edifício mantenha a energia térmica armazenada durante um maior período.

Inércia térmica

A inércia térmica de um edifício é um comportamento transitório da capacidade de um edifício poder absorver, armazenar e dissipar calor de forma progressiva dependendo da diferença de temperatura nas imediações devido maioritariamente à sua massa térmica.

A quantidade de calor armazenado depende da densidade ρ e capacidade de calor específico c do material, considerando que a taxa de troca de calor é influenciada pela condutividade térmica λ do material. Edifícios com grande quantidade de massa térmica dentro da envolvente térmica, demonstrará uma redução e reação retardada a uma excitação inicial, como um aumento súbito na temperatura ambiente externa.[8]

PCM

São materiais que permitem o armazenamento de calor latente. Armazenam e irradiam calor durante o processo de mudança de fase a uma temperatura quase constante. Assim, durante o dia, absorvem o calor na forma de calor latente proveniente da envolvente térmica opaca e não opaca, atingindo o ponto de fusão a uma temperatura constante e estabilizando a temperatura no interior do espaço. Durante a noite, este calor absorvido é dissipado de forma natural através de arrefecimento passivo ou arrefecimento ativo. Estes materiais podem ser integrados em soluções construtivas de coberturas, paredes e janelas.

Freecooling / Nightcooling

Outro dos métodos adotados, referidos como importantes, é o *freecooling*, que permite a remoção do calor armazenado, quando as condições climáticas no exterior são propícias. Normalmente as características ótimas de arrefecimento estão presentes durante o período da noite, pelo que também há literatura que o designa por *nightcooling*. Esta técnica é passiva quando não se recorre a meios que necessitam de energia.

Relativamente às técnicas de modulação de calor, existem autores que defendem que o fator mais importante para a modulação dos ganhos de calor é a inércia térmica, enquanto outros referem-se à combinação da inércia térmica e *freecooling / nightcooling*.

Rejeição ou dissipação dos ganhos de calor.

As técnicas de rejeição / dissipação de calor têm utilidade em condições climáticas onde as técnicas anteriores são insuficientes para providenciar o conforto térmico pretendido. Nesta técnica o excesso de calor é rejeitado por um dissipador de calor ambiental a uma temperatura mais baixa.

São considerados dissipadores de calor ambientais o ar, a água ou o céu. A remoção de excesso de calor depende de 2 fatores fundamentais sendo, a disponibilidade do dissipador de calor ambiental e a comunicação deste com o edifício.

Ventilação natural

Através da ventilação natural é possível a remoção do excesso de calor do interior do edifício para o exterior, se as condições climáticas forem favoráveis. Isto é, para fins de arrefecimento passivo, se a temperatura exterior for inferior à temperatura do ar interior.

Na ventilação natural o ar desloca-se devido à diferença de pressão estabelecida pelo vento ou pela diferença de temperatura entre o ar interior e o ar exterior. Este tipo de ventilação é influenciado pelas condições climáticas, exposição do local ao vento e rugosidade do terreno. Assim sendo, esta técnica apresenta alguns desafios quanto ao seu controlo sendo muito difícil verificar com rigor as taxas de renovação de ar, e, o seu controlo deve de ser rigoroso para evitar excesso o sobreaquecimento dos espaços.

Contudo, quando bem dimensionada e controlada, apresenta resultados significativos na redução da temperatura do ar interior.

Arrefecimento evaporativo

O arrefecimento evaporativo é uma tecnologia ambientalmente amigável e economizadora de energia amplamente utilizada. Pode ser definido como um processo de transferência de massa e calor no qual o ar é arrefecido pela evaporação da água e, como resultado, uma grande quantidade de calor é transferida do ar para a água e assim a temperatura do ar diminui [9].

A eficiência deste sistema assenta sobretudo nas condições climáticas com temperaturas exteriores altas e com humidade reduzida.

Como mostra a Figura 2.3, o arrefecimento evaporativo é categorizado em 2 tipos, o arrefecimento evaporativo direto e indireto. No primeiro o ar quente e seco entra em contacto direto com a água, que evapora diretamente no fluxo de ar, reduzindo assim a temperatura do ar enquanto humidifica o ar.

No segundo tipo, o ar primário passa por permutador de calor, enquanto o ar secundário transporta a energia térmica do ar primário na forma de vapor.

Este sistema poderá considerado passivo ou ativo dependendo da tecnologia apresentada recorrendo a ventilação a natural (passivo) ou a ventilação mecânica (ativo). No corrente trabalho apenas se consegue simular recorrendo à ventilação mecânica.

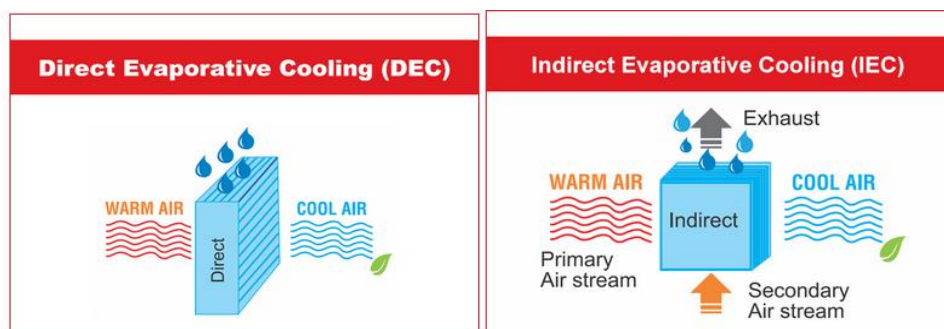


Figura 2.3 - Arrefecimento evaporativo direto e indireto.
(Fonte:www.atigroup.com)

2.1.3 Técnicas de arrefecimento passivo usados em climas quentes e secos

Os sistemas de arrefecimento passivo, considera que as estratégias de projeto climas quentes e secos, são as seguintes [10]:

Controlo solar nas fachadas externas - através de auto sombreamento, recorrendo à forma do edifício ou usando dispositivos de sombreamento.

Redução dos ganhos de calor externos – recorrendo ao uso de isolamento nos elementos da envolvente opaca ou através da redução da absorção solar.

Arrefecimento do edifício – usando a ventilação natural onde as características climáticas e do edifício assim o permitem.

2.2. Sistemas ativos

2.2.1. Classificação de sistemas ativos

Para a climatização de espaços por sistemas ativos, existem diversos tipos visando a melhoria do conforto dos ocupantes do edifício e a eficiência no consumo de energia. Os sistemas de climatização podem ser do tipo tudo-ar, tudo-água, ar-água e tudo-refrigerante (expansão direta) [11].

Tudo ar

No sistema tudo-ar, todo o condicionamento das características psicométricas, de temperatura e humidade no espaço é conseguido através da insuflação de ar a determinadas condições. Este sistema é o mais simples em termos de dimensionamento já que apenas terão de existir condutas, por onde circula o ar, entre a unidade de tratamento de ar, UTA ou UTAN e as diversas divisões do edifício. Como sistemas tudo-ar, existem sistemas CAV e sistemas VAV.

Nos sistemas CAV, a unidade opera o ventilador e o compressor na capacidade máxima, pelo que quando existe uma diminuição das cargas térmicas o compressor para o seu funcionamento. Este sistema de *on/off* para manter os espaços a uma temperatura constante não é eficiente, pelo que os custos com energia são altos.

Os sistemas VAV foram desenvolvidos para atender variações nas necessidades de arrefecimento e aquecimento em diferentes zonas do edifício, conseguem garantir variações de temperatura, humidade e caudal de ar, devido à variação do caudal de ar nos difusores, tendo como vantagem a sua utilização para climatização em multizona e apresentar custos de operação mais baixos [12].

Tudo-água

Os sistemas tudo-água caracterizam-se pelo facto de só circular água entre a central térmica e o espaço a climatizar, onde estão as unidades terminais (ventilo convetores). O facto de o fluido primário utilizado ser água constitui uma vantagem face ao sistema tudo-ar, uma vez que as tubagens onde circula água são muito mais compactas que as condutas de ar, ocupando menos espaço. As perdas térmicas nos circuitos de água serão menores, e é mais fácil garantir a estanquidade das redes. Contudo, este sistema de climatização não garante a qualidade do ar interior visto que não tem sistemas de condutas que o permitam.

Ar-água

A tipologia ar-água caracteriza-se pelo transporte de calor da fonte ao espaço ser realizado através da circulação de água e, simultaneamente, a renovação de ar ser garantida por uma rede de condutas de abastecimento de ar que entrega ar a uma temperatura neutra relativamente à do espaço, ou ligeiramente mais quente no Inverno e/ou mais frio no Verão.

Este é um sistema que exige um grande investimento inicial, mas proporciona poupanças no funcionamento e garante os requisitos de qualidade de ar interior

Tudo frigorígeno

Nos sistemas tudo-frigorígeno (expansão direta), o princípio de funcionamento é em tudo, semelhante aos sistemas tudo-água, porém o que circula nas tubagens é um fluido frigorígeno.

Podem existir diversos equipamentos com este efeito, tais como, as unidades *split*, os sistemas *multi-split* e as unidades VRF inverter (variação do fluido refrigerante). No capítulo seguinte explica-se com maior pormenor o sistema VRF.

2.2.2. Centrais térmicas (arrefecimento)

VRF

O VRF é um sistema de ar condicionado conhecido por fluxo de refrigerante variável do tipo multi-split, mas sendo possível ter mais de 60 unidades interiores independentes ligadas a apenas uma unidade exterior.

Os sistemas VRF podem usar bombas de calor ou sistemas de recuperação de calor para fornecer aquecimento e arrefecimento para todas as unidades internas e externas sem o uso de condutas de ar. A principal diferença entre estes 2 tipos de tecnologia é que apenas o último permite fornecer aquecimento e arrefecimento de forma simultânea [13].

Como vantagens deste sistema tem-se [14]:

- Diferentes opções de unidades interiores podendo ser adaptado ao design interior dos espaços,
- Operação muito simples, tão simples quanto operar um equipamento do tipo *split*⁵,
- Sistema bastante versátil, podendo a temperatura ser regulada de forma independente em cada espaço,
- Expansão modular,
- Adaptabilidade a estruturas existentes.

Como desvantagens apresentam-se as seguintes:

- Arquitetura de sistema complexa, grandes quantidades de tubagem de fluido frigorígeno a percorrer no interior de espaços climatizados,
- Potencialmente perigoso para os ocupantes, em caso de fugas, com possibilidade de entrada de fluido frigorígeno em espaços climatizados,
- Necessária mão de obra qualificada para instalação, comissionamento e manutenção especialmente para deteção e correção de fugas.

⁵ Split – Equipamento de ar condicionado com uma unidade condensadora (exterior) e uma unidade evaporadora (interior)

Chiller

O *Chiller* é um equipamento que produz água gelada que poderá ser usada na climatização de espaços ou na refrigeração de equipamentos industriais, sendo considerado, portanto, uma máquina frigorífica.

Ao ser usado na climatização, existe uma dependência da unidade de arrefecimento (*Chiller*) e as unidades interiores seja de baterias de arrefecimento de UTAs ou UTANs, sistemas tudo-ar, ou ainda de ventilo-convetores (sistemas tudo-água), sendo estes os veículos para fazer chegar o fluido ao interior dos espaços e proceder à remoção das cargas térmicas.

As tecnologias mais utilizadas neste equipamento são por compressão de vapor ou por absorção. Nos sistemas de compressão de vapor, o compressor é responsável pelo movimento frigorígeno no ciclo frigorífico. Os sistemas por absorção são ausentes de compressor, sendo que recorrem a uma fonte de calor como vapor, água quente ou ainda de gases de combustão de óleo ou gás a temperaturas elevadas, na ordem dos 100°C a 200°C, para o seu processo de refrigeração.

Como vantagens, identificam-se as seguintes:

- Tecnologia com mais de 6 décadas de existência,
- Eficiência energética alta,
- Não é perigoso para os ocupantes em caso de fuga, água a circular na tubagem, não apresentando perigo de entrada de fluido perigoso em espaços climatizados.

Como desvantagem, tem-se:

- Obrigatoriedade de disponibilidade de água,
- Requer espaço adicional para a sala de equipamentos, para unidades de tratamento de ar e para montagem de torres de arrefecimento.

2.3. Geotermia

A tecnologia geotérmica aproveita o calor da Terra. Apenas alguns metros abaixo da superfície, a Terra mantém uma temperatura quase constante, contrastando com as temperaturas extremas de verão e inverno.

Abaixo da superfície do solo, a temperatura aumenta com uma taxa de aproximadamente 33°C por cada 1000m de profundidade. Em algumas regiões, as atividades tectónicas e vulcânicas conseguem trazer temperaturas muito mais altas à superfície, sob a forma de água superaquecida e de vapor [15].

Existem 3 tipos de tecnologia que retiram vantagens da geotermia, como fonte de calor, sendo:

Bombas de calor geotérmicas

Aproveitam a diferença natural entre a temperatura do ar acima do solo e a temperatura do solo abaixo da superfície para mover o calor em apoio a usos finais como aquecimento arrefecimento de ambientes (ar condicionado) e até mesmo aquecimento de água.

Uma fonte terrestre ou sistema de permuta de calor geotérmica consiste numa bomba de calor conectada a uma série de tubos enterrados. Estes tubos podem-se ser instalados em valas horizontais logo, abaixo da superfície do solo, ou em furos verticais que vão várias centenas de metros abaixo do solo.

A bomba de calor faz circular um fluido de transporte de calor, às vezes água, através de tubos para mover o calor de um ponto a outro.

Assim, de acordo com a Figura 2.4, se a temperatura do solo for superior à temperatura do ar ambiente, a bomba de calor pode transferir calor do solo para o edifício. Contudo, a bomba de calor também pode reverter ciclo termodinâmico, movendo o calor do ar ambiente em um edifício para o solo, arrefecendo o edifício.

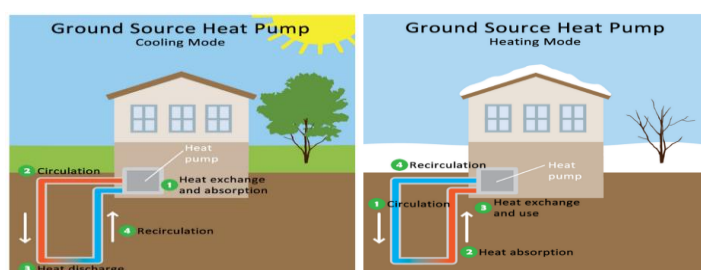


Figura 2.4 - Exemplo de funcionamento de bomba de calor.
(esq. - Modo arrefecimento, dta. - Modo aquecimento) (Fonte:
<https://www.epa.gov/rhc/geothermal-heating-and-cooling-technologies>)

Estes equipamentos requerem uma quantidade pequena de eletricidade para conduzir o processo de arrefecimento e aquecimento, sendo que para cada unidade de eletricidade consumida na operação, pode fornecer até 5 vezes de energia térmica do solo, resultando num benefício energético.

Geotermia de uso direto

Os sistemas geotérmicos de uso direto usam águas subterrâneas que são aquecidas por processos geológicos naturais abaixo da superfície da Terra e que pode atingir temperaturas de 90°C ou mais.

Corpos quentes de águas subterrâneas podem ser encontrados em muitas áreas com atividade vulcânica ou tectônica.

De acordo com a Figura 2.5, em locais como o Parque Nacional de Yellowstone e a Islândia, esses reservatórios de água subterrânea podem atingir a superfície, criando geiseres e fontes termais. Pode-se bombear água quente da superfície ou do subsolo para uma ampla gama de aplicações.

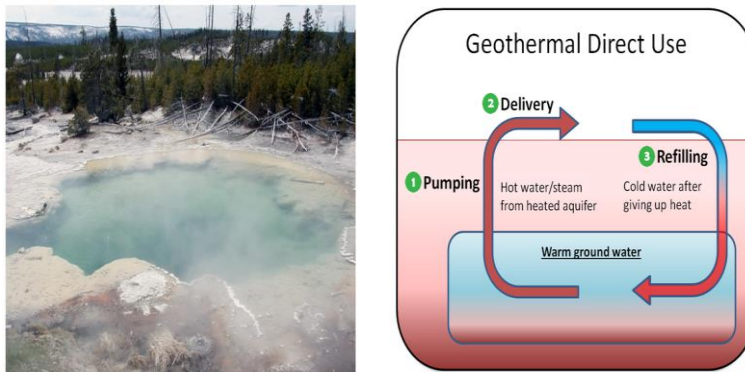


Figura 2.5 - Sistema geotérmico de uso direto. (Fonte: <https://www.epa.gov/rhc/geothermal-heating-and-cooling-technologies>)

A água dos sistemas geotérmicos diretos é quente o suficiente para muitas aplicações, incluindo aquecimento de piscinas em grande escala, aquecimento, arrefecimento e água quente sanitária para edifícios de grande porte ou para vários edifícios mais pequenos.

Sistemas geotérmicos profundos

Os sistemas geotérmicos profundos usam vapor muito abaixo da superfície da Terra para aplicações que requerem temperaturas de várias centenas de graus Celsius.

De acordo com a Figura 2.6, esses sistemas normalmente injetam água no solo por meio de um poço e trazem água ou vapor para a superfície por meio de outro.

Ao contrário das bombas de calor de fonte terrestre ou sistemas geotérmicos de uso direto, os projetos geotérmicos profundos podem envolver a perfuração de 1 km ou mais, abaixo da superfície da Terra.

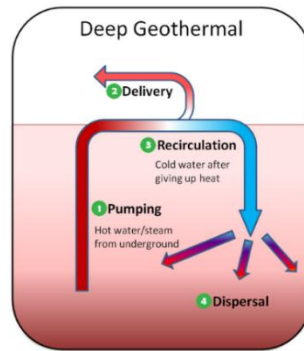


Figura 2.6 - Sistema geotérmico profundo.
(Fonte: <https://www.epa.gov/rhc/geothermal-heating-and-cooling-technologies>)

Estes sistemas conseguem fornecer calor de forma eficiente e limpa utilizada para processos industriais, alguns usos comerciais e agrícolas em larga escala. Além disso, o vapor pode ser usado para girar uma turbina e gerar eletricidade.

Embora o vapor geotérmico não exija combustível e tenha baixos custos operacionais, os custos iniciais poderão ser financeiramente desafiadores, especialmente ao perfurar poços de teste e de produção.

2.4. Simulação energética

Atualmente para que se possa realizar a simulação do comportamento térmico e energético dos edifícios existem diversos programas para o efeito como *Design Builder*, HAP, TRNSYS, entre outros.

Estes programas têm como vantagem a realização de simulações muito fiáveis, contendo uma gama de variáveis muito diversificada, tais como as dimensões do edifício, características das superfícies, equipamentos instalados, etc.

O *Design Builder*, utilizado na realização deste trabalho, é baseado no software *EnergyPlus* [16], que é o responsável pela realização dos cálculos e simulações. O programa *EnergyPlus* foi desenvolvido pelo Departamento de Energia nos Estados Unidos da América (*DoE –Department of Energy*) e os seus resultados estão de acordo com a norma ASHRAE 140⁶ [17], pelo que são aceites pelos códigos de construção de edifícios a nível mundial.

Tem a vantagem de ser um programa como uma componente gráfica muito robusta, permitindo ao utilizador visualizar o edifício e a disposição dos seus componentes. Contém uma base de dados muito extensa que engloba materiais de construção, equipamentos de climatização, perfis de utilização e ocupação, predefinidos, entre outros.

⁶ ASHRAE STD 140 - É a estrutura para estabelecer uma confiança em motores de modelação de energia e, coletivamente, na empresa de modelagem de energia. Também estabelece como um conjunto de testes de mecanismo neutro dinâmico que permite uma linha base mínima de recursos entre os mecanismos disponíveis a qualquer momento.

É possível ainda ao utilizador criar de raiz sistemas de climatização que não estejam disponíveis na base de dados.

2.4.1. Descrição das aplicações do programa *Design Builder*

Frequentemente utilizado na simulação energética de edifícios, com o programa é possível definir a geometria do modelo, orientação, equipamentos, componentes do edifício, entre outros. É possível também a análise detalhada dos consumos de energia de sistemas (aquecimento e arrefecimento) e de iluminação através de relatórios que poderão ser exportados em HTML (*Summary Reports*) e para o Excel.

2.4.2. Introdução de dados

Para a introdução de dados, o software respeita uma hierarquia de dados que assenta na seguinte forma:

Site>Building>Block>Zone>Surface>Opening

A descrição acima é verificada no programa em forma de árvore na Figura 2.7.

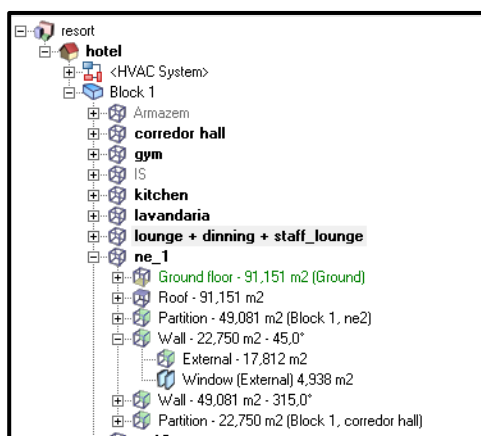


Figura 2.7 - Hierarquia do programa *Design Builder*.

De forma resumida, na parte superior do menu principal do programa, mostram-se os separadores que permitem a construção do modelo, de acordo com a Figura 2.8. Os separadores são *Layout*, *Activity*, *Construction*, *Openings*, *Lighting*, *HVAC*, *Generation*, *Economics*, *Miscellaneous* e *CFD*.

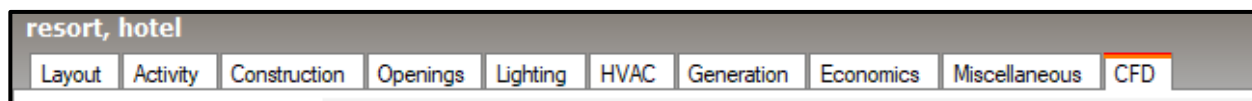


Figura 2.8 - Separador de cima, no menu principal *Design Builder*.

Layout – Permite a construção do modelo para simulação.

Activity – Parametrização de atividade na zona (ocupação, metabolismo, perfil ocupação e equipamentos, densidade de potência equipamentos, entre outros).

Construction – Criar as soluções construtivas do modelo ou adaptar alguns dos existentes na biblioteca.

Lighting – Tipo de iluminação, densidade de potência de iluminação, perfil de iluminação, etc.

HVAC – Contém todos os parâmetros de HVAC desde sistemas (modelo simples), perfis de funcionamento, controlo de humidade, ventilação natural, entre outros.

Generation – Permite a criação de sistemas fotovoltaicos e de armazenamento de energia em baterias.

Miscellaneous – Mostra a hierarquia e denominação da zona.

CFD – Inclui os parâmetros para realizar estudos de dinâmica de fluidos nas zonas em estudo.

Ainda na alteração de dados efetuadas na raiz, por exemplo em *Block*, todos os componentes dependentes deveriam alterar-se. Contudo, nem sempre acontece e o *Design Builder* contém a ferramenta *Model Data Grid View Management*, mostrada na Figura 2.9, podendo alterar-se todo o tipo de elementos, de forma individual ou por grupos a definir, tornando mais fácil a sua edição.

As alterações poderão ser feitas em elementos como as *Openings* (envolvente não opaca), na Figura 2.10, *Surface* (envolvente opaca), *Internal Gains* (ganhos internos), *HVAC* (AVAC), *Lighting* (iluminação), *Mechanical Ventilation* (ventilação mecânica) e *Natural Ventilation* (ventilação natural).

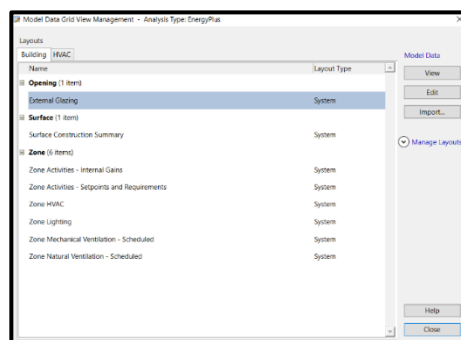


Figura 2.9 - Interface da ferramenta *Model Data Grid Management*.

External Glazing [Read Only]

Edit

Clear Filters

Export...

Search

^ v x

Block

Zone

Surface

Type	Adjacency	Area (m2)	Orientation (°)	Slope (°)	Glazing Template	External Windows
					Template	Glazing type
Block 1 (38 items) ▶						
Block 1 ▶ nw1 (1 item) ▶						
Block 1 ▶ nw1 ▶ Wall - 17,500 m2 - 315,0° (1 item) ▶						
Window	External	4,375	315,0	90,0	Template_envidraça...	Envidraçados_exterio...
Block 1 ▶ corredor hall (1 item) ▶						
Block 1 ▶ corredor hall ▶ Wall - 38,344 m2 - 225,0° (1 item) ▶						

Figura 2.10 - Exemplo do conteúdo *Openings > External Glazing*.

Na parte inferior do menu principal do programa, existe uma barra de ferramentas com separadores onde estão incluídos 2 dos separadores mais utilizados para este trabalho, designados por *Cooling Design* e o *Simulations*, como mostra na Figura 2.11.



Figura 2.11 - Separador de baixo, no menu principal *Design Builder*.

Cooling Design –Dimensionamento das potências de projeto para arrefecimento.

Simulations –Verificação dos consumos energéticos associados ao edifício

2.4.3. Dimensionamento potências de projeto para arrefecimento (*Cooling Design*)

As simulações de projeto de arrefecimento usando o *Design Builder* têm os seguintes pressupostos [18]:

- Temperaturas externas periódicas em estado estacionário calculadas usando condições climáticas máximas e mínimas projetadas para o verão,
- Sem vento,
- Inclui ganhos solares através de janelas e ventilação natural programada.
- Inclui ganhos internos de ocupantes, iluminação e outros equipamentos.
- Tem em consideração a condução e convecção de calor entre zonas de diferentes temperaturas.

Os resultados das simulações de *Cooling Design* apresentam-se com duas características fundamentais, sendo que poderão ser resultado de cargas térmicas coincidentes ou não-coincidentes.

Como o nome indica, se analisar-se de forma coincidente, o resultado será a hora do dia em que o pico da potência térmica se fez sentir, sendo que nas restantes horas do dia as necessidades de arrefecimento serão menores, e consequentemente o fator de carga também. No regime não coincidente, o resultado global será superior ao não coincidente, porque apresenta os picos de cargas térmicas para cada zona de forma independente.

Para o caso de estudo adotou-se o resultado das cargas térmicas de forma coincidente para o dimensionamento da potência térmica do equipamento para arrefecimento.

2.4.4. Consumos energéticos (*Simulations*)

Para analisar a eficiência das soluções de climatização, os impactos das técnicas de arrefecimento passivo nos edifícios ou as horas de desconforto de acordo com a ASHRAE-55 [19], recorre-se à simulação de consumos, em *Simulation*, como mostra a Figura 2.12. Este tipo de simulação ocorre durante um período específico, determinado pelo utilizador.

The image shows a software window titled "Edit Calculation Options" with a tabbed interface. The "Options" tab is selected. Under "Simulation Period", the "From" section has "Start day" set to 13 and "Start month" set to Jun. The "To" section has "End day" set to 17 and "End month" set to Jun. There is an unchecked checkbox for "Run simulation for multiple years". Under "Output Intervals for Reporting", there are four checkboxes: "Monthly and Run period" (checked), "Daily" (checked), "Hourly" (checked), and "Sub-hourly" (unchecked).

Figura 2.12 - Inserção de dados em *Simulation*.

Os dados resultantes da simulação poderão ter uma periodicidade mensal, diária, horária e sub horária, dependendo do que o utilizador pretende que seja analisado. Os relatórios poderão ser exportados para o Excel, e posteriormente trabalhados, ou em HTML contendo dados de análise, que vão para além dos denominados no início do capítulo.

Contudo, uma vez que o projeto ainda está numa fase muito inicial, neste trabalho apenas serão analisados parâmetros ligados aos consumos de energia final, consumos de água (arrefecimento evaporativo), as horas de desconforto dos ocupantes segundo a ASHRAE-55 e as horas em que o sistema não conseguiu atender a temperatura de *setpoint*.

Capítulo 3

Enquadramento técnico e normativo

3.1. Envolvente térmica

A envolvente térmica de um edifício resulta de um conjunto de soluções construtivas que separam espaços condicionados de espaços não condicionados, ou com o exterior, e, que podem ser de natureza opaca ou não opaca, como mostra na Figura 3.1.

Da envolvente opaca consideram-se a cobertura, paredes exteriores e de compartimentação interior, paredes e pavimentos em contacto com espaços não climatizados e paredes e pavimentos em contacto com o solo. Da envolvente não opaca consideram-se os vãos envidraçados em paredes exteriores e interiores e em coberturas.

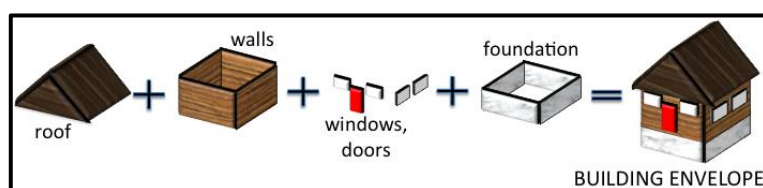


Figura 3.1 - Envolvente térmica do edifício.
(Fonte: nergyleducation.ca/encyclopedia/Building_envelope)

As diversas soluções construtivas da envolvente térmica de um edifício são compostas por materiais construtivos. Os materiais têm como propriedade intrínseca, a **condutibilidade térmica** (λ ou k), expressa em **W/m.K**,

A condutibilidade térmica, é uma propriedade que caracteriza os materiais homogéneos na condução do fluxo de calor numa **espessura (m)**, quando entre 2 faces planas se estabelece a diferença de 1°C ou 1K. Materiais com alta condutibilidade térmica conduzem calor de forma mais rápida que os materiais com baixa condutibilidade térmica. Assim, materiais com condutibilidade térmica elevada são utilizados como dissipadores de calor e materiais de baixa condutibilidade térmica são utilizados como isolantes térmicos.

Os materiais construtivos de uma envolvente de um edifício, são colocados em camadas com diversas espessuras, de acordo com o pretendido, que em função da condutibilidade térmica, resulta a sua resistência térmica.

A **resistência térmica** é a capacidade de oposição à transferência de calor de um elemento, sendo determinado o seu valor pelo quociente da espessura e da condutibilidade térmica do material, como mostra na Equação 1.

$$R = e/\lambda. \quad (\text{m}^2.\text{K}/\text{W}) \quad (1)$$

Onde:

R – Resistência térmica do elemento

e – Espessura do elemento

λ – Condutibilidade térmica do elemento

Esta é a forma de cálculo da resistência térmica do elemento construtivo. Contudo, para determinar a resistência da solução construtiva existe a necessidade de calcular a resistência térmica total, adicionando as resistências superficial interior (R_{si}) e superficial exterior (R_{se}). Estes valores estão tabelados e são escolhidos de acordo com o sentido do fluxo de calor (horizontal e vertical), e, dentro do sentido do fluxo de calor vertical, se o fluxo é ascendente ou descendente.

Considera-se fluxo ascendente quando a temperatura interior é superior à exterior, e, no caso de o fluxo ser descendente, o inverso.

Em baixo, na Tabela 3.1, demonstram-se os dados a considerar relativamente à resistência térmica superficial, retirada do ITE 50 do LNEC [20].

Tabela 3.1 - Resistências térmicas superficiais (R_{se} e R_{si}).
(Fonte: Quadro I.3 / ITE 50 - LNEC)

Sentido do fluxo de calor	Resistência térmica superficial [$(m^2 \cdot ^\circ C)/W$]	
	exterior R_{se}	interior R_{si}
Horizontal ⁽¹⁾	0,04	0,13
Vertical ⁽²⁾		
	ascendente descendente	0,04 0,10 0,17

1 – Paredes (até +/- 30° com a vertical)
2 – Coberturas e pavimentos (até +/- 60° com a horizontal)

De acordo com a Equação 2, a soma das resistências das diversas camadas / elementos, em conjunto com a soma das resistências superficiais (interior e exterior), dão origem ao valor da resistência total (R_t), expressa em $m^2 \cdot K/W$, sendo:

$$R_t = R_1 + \dots + R_n + R_{se} + R_{si} \quad (m^2 \cdot K/W) \quad (2)$$

Onde:

R_t – Resistência térmica total

R_1 – Resistência térmica do elemento 1

R_n – Resistência térmica do n ésimo elemento

R_{se} – Resistência da superfície exterior

R_{si} – Resistência da superfície interior

De acordo com a Equação 3, o coeficiente de transmissão térmica, designado pela letra U e expresso em $W/m^2 \cdot K$, representa a grandeza que define as características térmicas de um elemento construtivo, sendo:

$$U = 1/R_t \quad (W/m^2 \cdot K) \quad (3)$$

Onde:

U – Coeficiente de transmissão térmica ($W/m^2 \cdot K$)

R_t – Resistência térmica total ($m^2 \cdot K/W$)

De seguida, da Tabela 3.2 à Tabela 3.4, seguem exemplos de uma solução construtiva, da sua resistência térmica superficial e do seu coeficiente de transmissão térmica, que contempla o explanado anteriormente.

Tabela 3.2 - Solução construtiva do elemento.

Elementos construtivos						Coberturas
Camadas	Material		Espessura (m)	Condutibilidade térmica [W/(m.°C)]	Resistência térmica [(m2.°C)/W]	Massa volúmica seca (valor médio) kg/m3
1	BETÕES	II - betão normal	0,2	2	0,100	2450
2	BETÕES	I - betão de inertes poliestireno expandido	0,1	0,18	0,556	500
3	ISOLANTES	(XPS) - poliestireno expandido estrudado	0,27	0,037	7,297	32,5
4	MATERIAIS IMPERMEABILIZ AÇÃO_MASTIQUES	asfalto puro	0,01	0,7	0,014	2100

Tabela 3.3 – Resistência térmica superficial do elemento construtivo (Interior e Exterior).

	Resistência térmica [(m2.°C)/W]
R _{si} horizontal (paredes até +/- 30° com a vertical)	0,13
R _{se} horizontal (paredes até +/- 30° com a vertical)	0,04

Tabela 3.4 - Espessura, resistência térmica total e coeficiente de transmissão térmica.

Espessura (m)	0,58
R _t (m2.°C)/W	8,18
U - W/(m2.°C)	0,122

3.1.1. Requisitos da envolvente térmica (SBC)

O edifício de estudo está localizado na Arábia Saudita, tendo como requisitos da envolvente térmica do edifício o cumprimento dos requisitos do regulamento local, neste caso o SBC.

Desta forma, após consulta ao regulamento verificou-se que os requisitos para a envolvente térmica são designados de acordo com 3 fatores fundamentais, sendo:

- A tipologia do edifício quanto à sua ocupação e utilização (residencial ou comercial),
- O número de graus dia do local em estudo,
- O *Window Wall Ratio* (relação envidraçado à parede).

Tipologia do edifício - Ocupação e Utilização / Residencial ou Comercial

No código local SBC 2007 [21], na secção 2.10, verifica-se que o hotel está enquadrado na tipologia de ocupação / utilização como *Residential Group R.*, sendo composto por 4 tipologias, de R1 a R4.

A categoria em se enquadra o hotel é a *Residential Group R-1* tendo como definição, a seguinte:

- “*Ocupações residenciais onde os ocupantes são principalmente de natureza transitória, incluindo:*
- *Pensões (transitório)*
- *Hotéis (transitório)*
- *Motéis (transitório)”*

(Fonte: SBC 2007- traduzido pelo autor)

Número de graus dia do local em estudo

Verificada a tipologia de ocupação / utilização do espaço, determinar-se-á o número de graus dia para localização Riade, Arábia Saudita.

No regulamento local, SBC, na secção SBC 601 – *Energy Conservation Requirements* [22], existem 27 estações meteorológicas determinadas pelo número de graus dia (DD). A necessidade de aquecimento em cada local verifica-se pelos graus-dia de aquecimento (*HDD*), e as necessidades de arrefecimento através dos graus-dia de arrefecimento (*CDD*) Estes valores, *HDD* e *CDD*, são estabelecidos através da diferença de temperatura média diária com uma temperatura base, que neste caso é 18°C, sendo que apenas os valores positivos tomados em consideração para o somatório.

Os valores dos graus-dia determinam a zona climática e são o resultado da soma dos graus dia de aquecimento (*HDD*) e de arrefecimento (*CDD*) de cada região, e a determinação de cada um é dada como demonstra a Equação 4 e a Equação 5.

$$HDD = \sum_{i=1}^n (T_{base} - T_i) \quad (4)$$

$$CDD = \sum_{i=1}^n (T_i - T_{base}) \quad (5)$$

Onde:

HDD – Graus-dia de aquecimento

CDD – Graus-dia de arrefecimento

Tbase – Temperatura base

Ti - Temperatura média diária.

A Figura 3.2, mostra o gráfico com a temperatura média para a localização de estudo, Riade, e a temperatura base de 18°C que confere o limite para a determinação dos graus-dia de aquecimento e de arrefecimento.

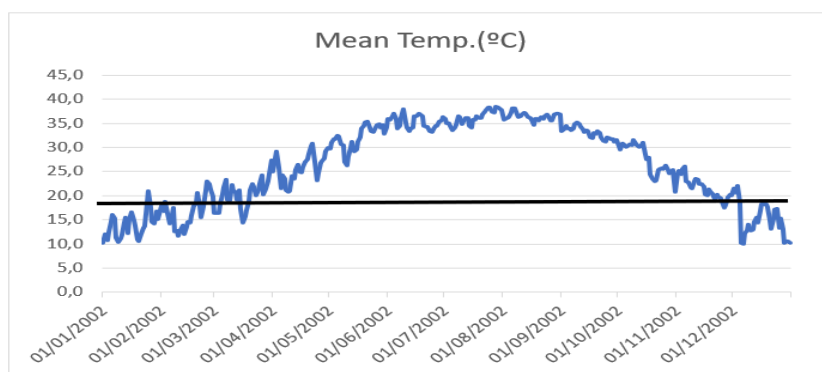


Figura 3.2 - Temperatura média para Riade, limite superior HDD₁₈ e limite inferior CDD₁₈.

Como se constata no gráfico acima, o limite superior para os graus dia de aquecimento e o limite inferior para os graus dia de arrefecimento é de 18°C, não existindo interseção de valores, como existe na norma ASHRAE, que se verificará mais à frente.

De acordo com o ficheiro climático *SAU_Riyadh.404380_IWEC* para o ano de referência de 2002, o autor decidiu aferir os valores para demonstrar que estes estavam em linha com o SBC resultando no seguinte:

$HDD_{18} - 305$

$CDD_{18} - 3300$

$DD - 3605$

Na Tabela 3.5, apresentam-se os dados correspondentes ao número de graus dia (DD) para as 27 estações meteorológicas na Arábia Saudita, demonstrado os valores para a cidade de Riade.

Tabela 3.5 - Estações meteorológicas do reino da Arábia Saudita e os seus graus-dia.

(Fonte: Tabela 2.2.2 / SBC 601 *Energy Conservation Requirements*)

TABLE 2.2.2
DEGREE DAYS FOR METEOROLOGICAL STATIONS OF
KINGDOM OF SAUDI ARABIA

S. No.	Station / City	DD*
1	TURAIIF	1,800
2	ARAR	2,600
3	GURIAT	1,800
4	AL-JOUF	2,500
5	RAFHA	2,900
6	QAISUMAH	3,400
7	TABUK	2,300
8	HAFAR AL-BATIN	3,600
9	HAIL	2,600
10	WEJH	2,800
11	GASSIM	3,300
12	DHARHAN	3,500
13	AL-HASA	3,800
14	MADINAH	4,200
15	RIYADH	3,300
16	BISHA	3,500
17	KHAMIS MUSHAIT	1,200
18	JEDDAH-KFIA	3,900
19	TAIF	2,200
20	MAKKAH	4,900
21	YANBU	4,000
22	AL-BAHA	2,100
23	WADI-ALDAWASER	3,800
24	ABHA	1,000
25	NAJRAN	3,000
26	SHARORAH	4,000
27	GIZAN	4,600

* (Base 18°C) and DD values are rounded off to the nearest hundred.

O Window Wall Ratio (relação envidraçado à parede).

Após a determinação dos dois fatores anteriores, o tipo de ocupação / utilização do espaço e os graus dia, passou-se à verificação da relação do envidraçado à parede exterior, o WWR.

A importância desta relação resulta no facto de que para uma mesma localização, com o mesmo número de graus dia, a sua diferença afeta os requisitos das envolventes opaca e não opaca.

A seguir, na Tabela 3.6, apresentam-se os valores máximos admissíveis de acordo com as diversas relações entre DD e WWR, presente no SBC 601. Os graus-dia utilizados para escolha dos requisitos da envolvente térmica foram com base na Tabela 3.5, 3800 DD, entre os 3610 DD e os 3889 DD, e, com percentagem de área envidraçada de 20%.

Tabela 3.6 - Relação dos WWR com os requisitos da envolvente térmica

WWR ^a	Envidraçados ^a	Cobertura ^a	Paredes-Externas ^a	Pavimento- contacto-exterior ^a
(%) ^a	(W/m ² .K) ^a	(W/m ² .K) ^a	(W/m ² .K) ^a	(W/m ² .K) ^a
8 ^a	2.44 ^a	0.149 ^a	0.357 ^a	0.303 ^a
12 ^a	2.29 ^a	0.116 ^a	0.270 ^a	0.303 ^a
15 ^a	2.00 ^a	0.116 ^a	0.270 ^a	0.270 ^a
18 ^a	1.88 ^a	0.116 ^a	0.256 ^a	0.227 ^a
20 ^a	1.7 ^a	0.116 ^a	0.217 ^a	0.270 ^a
25 ^a	1.42 ^a	0.116 ^a	0.303 ^a	0.188 ^a

Assim, constata-se que os requisitos para a envolvente térmica se alteram de acordo com a relação envidraçado à parede.

Os valores apresentados a seguir, na Tabela 3.7, correspondem ao coeficiente de transmissão térmica U (W/m².°C) para os envidraçados. Para os restantes elementos construtivos, os valores correspondem à sua resistência térmica R (m².°C/W).

Tabela 3.7 - Valores da envolvente térmica para WWR de 20%.
(Fonte: Tabela 4.2.2.4(5) / SBC 2007)

PRESCRIPTIVE BUILDING ENVELOPE REQUIREMENTS, DETACHED ONE-
AND TWO-FAMILY DWELLINGS WINDOW AREA 20 PERCENT OF GROSS
EXTERIOR WALL AREA

Degree Days	Maximum		Minimum				
	Glazing U-Factor	Ceiling R-value	Exterior wall R-value	Floor R-value	Basement wall R-value	Slab perimeter R-value and depth	Crawl space wall R-value
0-279	4.55	R-3.3	R-1.9	R-1.9	R-0	R-0	R-0
280-559	4.26	R-5.3	R-2.3	R-1.9	R-0	R-0	R-0.7
560-829	3.98	R-5.3	R-2.3	R-1.9	R-0	R-0	R-0.9
830-1109	3.41	R-5.3	R-2.3	R-1.9	R-0.9	R-0	R-0.9
1110-1389	2.95	R-6.7	R-2.3	R-1.9	R-0.9	R-0	R-1.1
1390-1669	2.84	R-6.7	R-2.3	R-3.3	R-1.1	R-0	R-1.2
1670-1949	2.61	R-6.7	R-2.3	R-3.3	R-1.2	R-0	R-1.6
1940-2219	2.39	R-6.7	R-2.3	R-3.3	R-1.4	R-1.1 0.6 m	R-1.8
2220-2499	2.10	R-6.7	R-2.3	R-3.3	R-1.6	R-1.1 0.6 m	R-2.3
2400-2779	2.10	R-6.7	R-2.8	R-3.3	R-1.6	R-1.1 0.6 m	R-2.8
2780-3059	2.05	R-6.7	R-3.3	R-3.3	R-1.6	R-1.1 0.6 m	R-2.8
3040-3339	1.88	R-8.6	R-3.5	R-3.3	R-1.8	R-1.2 0.6 m	R-3.0
3340-3609	1.76	R-8.6	R-4.2	R-3.3	R-1.8	R-1.2 1.2 m	R-3.0
3610-3889	1.70	R-8.6	R-4.6	R-3.7	R-1.9	R-1.8 1.2 m	R-3.0
3890-4729	1.70	R-8.6	R-4.6	R-3.7	R-1.9	R-2.1 1.2 m	R-3.3
4730-4999	1.70	R-8.6	R-4.6	R-3.7	R-3.3	R-2.1 1.2 m	R-3.3
4000-7229	1.70	R-8.6	R-4.6	R-3.7	R-3.3	R-2.8 1.2 m	R-3.3

Salienta-se ainda que existem 17 intervalos de graus dia, sendo que, a cada combinação existem valores atribuídos à envolvente opaca e não opaca, detalhando as características das soluções construtivas da envolvente térmica a adotar.

3.1.2. Requisitos da envolvente térmica (ASHRAE 90.1)

Para determinar os requisitos desta norma norte americana, que estabelece recomendações a nível internacional, para localização em estudo em primeiro lugar é necessário identificar a que zona pertence. Assim, consultando a norma ASHRAE90.1 verificam-se os graus dia para a cidade de Riade, Arábia Saudita.

Na norma ASHRAE 90.1, os valores da temperatura de referência são diferentes das encontradas na norma local SBC, sendo que os seus valores são apresentados em graus *Fahrenheit* (°F). Assim, os graus dia de arrefecimento (CDD50), a temperatura base é de 50°F, correspondendo a 10°C, e, para os graus dia de aquecimento (HDD65), a temperatura base é de 65°F, que corresponde a 18,33°C.

Na Figura 3.3, mostra-se um gráfico à imagem do representado para os graus dia SBC, no Capítulo 3.1.1.

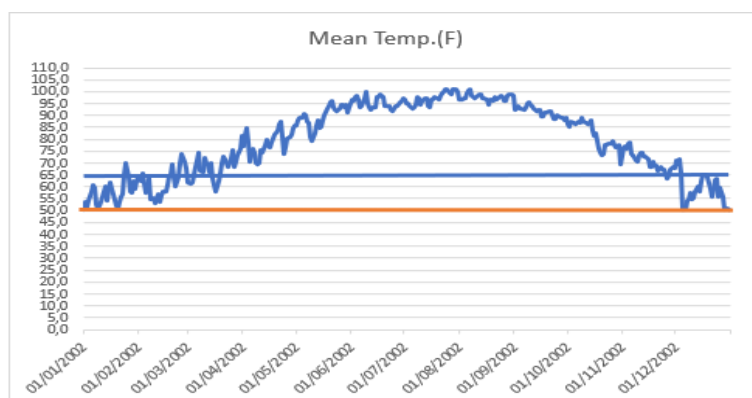


Figura 3.3 - Temperatura média para Riade, limite superior HDD₆₅ (azul) e limite inferior CDD₅₀ (laranja). (Fonte: Realizado pelo autor com dados provenientes do *EnergyPlus*)

Como se verifica no gráfico existe uma interseção de valores dos graus dia de aquecimento (HDD65) e os graus dia de arrefecimento (CDD50).

Na Tabela 3.8, encontram-se os valores dos graus dia CDD50 e HDD65 para a localização Riade, correspondendo 10 936 e 381 graus dia, retirados da Tabela D-3 da norma ASHRAE 90.1.

Tabela 3.8 - Dados climáticos para Riade, Arábia Saudita. (Fonte: Tabela D-3 / ASHRAE 90.1)

Country/City	Province or Region	Latitude	Longitude	Elev., ft	HDD65	CDD50	Heating Design Temperature	Cooling Design Temperature	
								Dry-Bulb	Wet-Bulb
Saudi Arabia									
Dhahran		26.27 N	50.17 E	72	381	10,936	NA	NA	NA
Riyadh		24.70 N	46.73 E	2005	536	10,725	41	110	64

De acordo com o ficheiro climático *SAU_Riyadh.404380_IWEC* para o ano de referência de 2002, o autor decidiu aferir os valores para demonstrar que estes estavam em linha com os valores ASHRAE, resultando no seguinte:

$$\begin{aligned}HDD_{65} &= 599 \\CDD_{50} &= 10648\end{aligned}$$

Após verificação do número de graus dia para a zona em estudo é necessário classificar quanto à sua região climática, que nesta norma é composta por um algarismo, podendo ser sucedido por uma sigla (A, B ou C), determinando se é uma zona húmida, seca ou marítima.

Para o efeito, recorreu-se à Tabela *B1-4 – Internacional Climate Zones Definitions*, da mesma norma, e confirmou-se que zonas com números de graus dia de arrefecimento acima dos 9 000 pertencem à Zona 1.

Quanto aos fatores que ditam a escolha da definição climática da zona são diversos, contudo para determinação da zona seca é dada pela Equação 6.

$$Pin < 0.44 \times (TF - 19.5) \quad (6)$$

Onde:

Pin = precipitação anual (polegadas),

TF = temperatura média anual (°F)

Assim, verificando a equação com dados locais tem-se:

$$\begin{aligned}0.3 \text{ in} &< 0.44 \times (79,18 - 19,5) \\0.3 \text{ in} &< 26,26\end{aligned}$$

Fonte de dados:

Precipitação anual - (<https://weatherspark.com/y/104018/Average-Weather-in-Riyadh-Saudi-Arabia-Year-Round>)

Temperatura média – Calculado pelo autor com base no ficheiro climático *SAU_Riyadh.404380_IWEC*

Assim, a região de Riade é classificada como uma região *1B – Very Hot and Dry* (Muito Quente e Seca), como se pode constatar na Tabela *B1-4 Internacional Climate Zone Definitions*, presente na norma ASHRAE 90.1, conforme mostra na Tabela 3.9.

Tabela 3.9 - Definição das zonas climáticas internacionais. (Fonte: Tabela B1-4 / ASHRAE 90.1)

TABLE B1-4 International Climate Zone Definitions		
Zone Number	Name	Thermal Criteria
1	Very Hot-Humid (1A), Dry (1B)	$9000 < CDD50^{\circ}F$
2	Hot-Humid (2A), Dry (2B)	$6300 < CDD50^{\circ}F \leq 9000$
3A and 3B	Warm-Humid (3A), Dry (3B)	$4500 < CDD50^{\circ}F \leq 6300$
3C	Warm-Marine	$CDD50^{\circ}F \leq 4500$ and $HDD65^{\circ}F \leq 3600$
4A and 4B	Mixed-Humid (4A), Dry (4B)	$CDD50^{\circ}F \leq 4500$ and $3600 < HDD65^{\circ}F \leq 5400$
4C	Mixed-Marine	$3600 < HDD65^{\circ}F \leq 5400$
5A, 5B and 5C	Cool-Humid (5A), Dry (5B), Marine (5C)	$5400 < HDD65^{\circ}F \leq 7200$
6A and 6B	Cold-Humid (6A), Dry (6B)	$7200 < HDD65^{\circ}F \leq 9000$
7	Very Cold	$9000 < HDD65^{\circ}F \leq 12600$
8	Subarctic	$12600 < HDD65^{\circ}F$

Após determinação da zona climática identificam-se os requisitos para as envolventes térmicas opaca e não opaca.

Para o efeito consultou-se a tabela correspondente a esta zona climática na norma ASHRAE 90.1, *Table 5.5-1 Building Envelope Requirements for Climate Zone 1 (A,B,C)*.

A relação envidraçado-parede nesta norma não tem um impacto direto na determinação da envolvente, i.e., os valores da envolvente opaca e não opaca assumem um mesmo valor independentemente da sua relação, contudo estabelece um limite máximo de 40%.

3.1.3. Comparativo de requisitos da envolvente térmica (SBC vs. ASHRAE 90.1)

Após consulta dos dados relativos aos requisitos da envolvente opaca e não opaca nas duas normas (SBC e ASHRAE 90.1), na Tabela 3.10 segue um quadro comparativo com as diferenças entre ambas.

Tabela 3.10 - Valores máximos admissíveis de coeficientes de transmissão térmica (U/W.K).
(Fonte: SBC e ASHRAE 90.1)

SBC 601 – Energy Conservation Requirements		ASHRAE 90.1
Solução construtiva	U(W/m ² .°C)	U(W/m ² .°C)
Cobertura	0.12 (R-8.6)	0.04 (R-25)
Paredes externas	0.217 (R-4.63)	0.151 (R- 5.7)
Pavimento em contacto com o exterior	0.27 (R-3.7)	0.322 (R- 3.11)
Pavimento em contacto com o solo	0.55(R-1.8 – 1.2m)	Sem isolamento
Envidraçados verticais	1.70 (WWR 18% - 20%)	1.10 (WWR 0%-40%)
SHGC	0.25	0.25

No quadro apresentado na Tabela 3.10, mostra as diferenças de requisitos entre as duas normas SBC e ASHRAE 90.1, verificando que relativamente à cobertura e paredes externas, os coeficientes de

transmissão térmica são significativamente menores na norma ASHRAE 90.1 para a região 1B, resultando num melhor isolamento térmico do edifício.

3.2. Inércia térmica

A inércia térmica interior de uma fração autónoma é função da capacidade calorífica que os locais apresentam e depende da massa superficial útil de cada um dos elementos da construção, que se traduz pela capacidade de absorver e libertar calor, de e para o ambiente envolvente.

Teoricamente, é responsável pela atenuação da amplitude térmica no interior dos edifícios, contribuindo desta forma para a redução dos consumos de energia associados a sistemas de climatização, promovendo também um atraso da temperatura da envolvente relativamente à temperatura do meio ambiente, que poderá ser mais ou menos rápido conforme a inércia térmica dos espaços, como mostra na Figura 3.4.

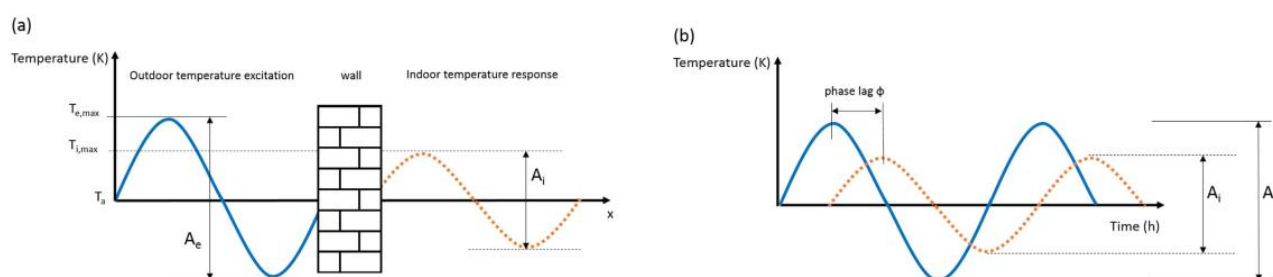


Figura 3.4 - Efeitos da inércia térmica.

(Fonte: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032117312236>)

Para a classificação da inércia térmica I_t , utilizou-se o método disposto no Despacho n.º 6476-H/2021 [23], de 1 de julho, determinando as massas superficiais úteis dos elementos construtivos **Ms** e os respetivos coeficientes de redução em função da resistência térmica superficial dos seus revestimentos **ri**.

As massas superficiais uteis dos elementos construtivos **Ms** são determinadas a partir da sua densidade, ou massa por unidade de superfície, e suas dimensões aplicáveis. Resultam ainda da aplicação da majoração do valor das massas superficiais brutas e, da composição dos elementos a considerar para essas massas superficiais brutas, em função dos tipos de elementos construtivos, consoante a sua localização/enquadramento no edifício/fração.

3.3. Cargas térmicas

As cargas térmicas são um conjunto de fatores que influenciam diretamente o conforto térmico no interior dos espaços através da alteração de parâmetros térmicos. As cargas térmicas resultam de ganhos ou perdas de calor de qualquer elemento do edifício e podem ter origem externa ou interna.

Como ganhos ou perdas de calor de origem externa consideram-se os que são através da envolvente opaca e não opaca (calor sensível) e através da admissão de ar exterior (calor sensível e latente).

Os ganhos de calor com origem no interior consideram-se a ocupação de pessoas e equipamentos (calor sensível e latente) e a iluminação (calor sensível).

Como nota, nem sempre se verificam os valores das cargas térmicas iguais aos dos ganhos de calor, e, os seus picos poderão não ser coincidentes, devido à inércia térmica.

Os ganhos de calor internos têm como base a densidade de potência de equipamentos e iluminação, e, o número e atividade dos ocupantes dos espaços e o tempo de atividade / funcionamento.

Para o *software* assumir os ganhos de calor internos de forma dinâmica, de acordo com o exemplo mostrado na Figura 3.5, há-que determinar-se os *schedules*, perfis de ocupação (pessoas) e funcionamento (equipamentos e iluminação), sendo imprescindíveis na análise de necessidades de arrefecimento, para uma base horária. Como perfis de ocupação e funcionamento utilizados, utilizaram-se os que existem por defeito no programa de simulação energética *Design Builder*. Estes perfis são para todos os dias da semana, incluindo fins de semana e feriados.

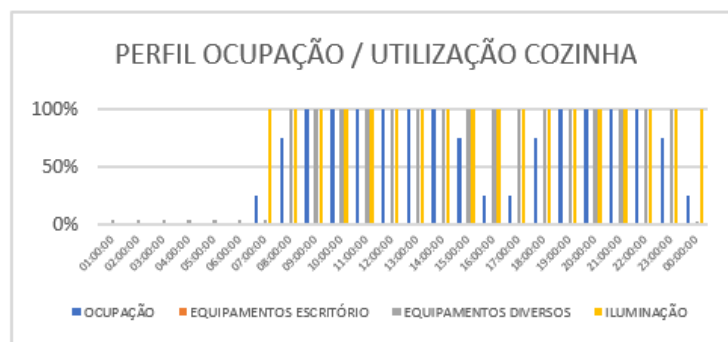


Figura 3.5 - Perfil de ocupação / utilização para o espaço Cozinha.

3.4. Conforto térmico

De acordo com a norma ASHRAE 55:2010, o conforto térmico é uma sensação térmica dos ocupantes relativamente ao meio ambiente, que se expressa em satisfação. Sendo cada indivíduo, único, a sensação de conforto térmico não é sentida de igual forma por todos, tornando a tarefa de satisfazer as necessidades térmicas mais complexa. Quando ocorrem perdas térmicas para o exterior, estas são compensadas pelo metabolismo do corpo humano através das respiração, transpiração e convecção entre a pele e o vestuário e o meio ambiente, por forma a atingir o equilíbrio térmico promovendo a sensação de conforto.

São vários os fatores que influenciam este equilíbrio térmico. Fanger (1988) desenvolveu uma equação considerando seis fatores distintos na definição de conforto sendo individuais e ambientais.

Como fatores individuais considera-se a taxa de metabolismo e o isolamento térmico oferecido pela roupa vestida, e como fatores ambientais a temperatura do ar, a humidade relativa, a velocidade do ar e a temperatura das superfícies do espaço.

Identificando estes seis fatores, *Fanger* desenvolveu uma equação – Equação 7 - que consegue prever o conforto térmico atingido nas zonas climatizadas através do cálculo de um índice denominado PMV (*Predicted Mean Vote*).

$$PMV = 0.303e - (0.036M + 0.28)L \quad (7)$$

M representa a taxa de metabolismo expressa em W/m^2 ,

L carga térmica corporal, calculada através da diferença entre a energia metabólica e o calor dissipado para o meio envolvente.

O valor PMV é um índice que prevê o valor médio da avaliação da climatização que será obtido quando é inquirido um grupo grande de pessoas. A sensação térmica terá como resultado um de uma escala de 7 valores discretos, que vai de, (-3) para a sensação de muito frio, a (+3) para a sensação de muito quente, como mostra na Tabela 3.11.

Tabela 3.11 - Escala de sensação térmica do modelo de Fanger.

Índice PMV	Estado
+3	Muito quente
+2	Quente
+1	Ligeiramente quente
0	Neutro
-1	Ligeiramente frio
-2	Frio
-3	Muito frio

Determinado o índice PMV, é possível determinar o índice de PPD, que estabelece uma previsão quantitativa do percentual de insatisfeitos termicamente, através da Equação 8.

$$PPD = 100 - 95 \times e^{(-0,03353 \times PMV^4 - 0,2179 \times PMV^2)} \quad (8)$$

Segundo a ASHRAE 55-2010, torna-se como aceitável uma percentagem de insatisfeitos prevista menor que 10% em função da votação média prevista com um valor entre -0,5 e +0,5, sendo estes valores considerados como neutros, de acordo com o gráfico apresentado na Figura 3.6.

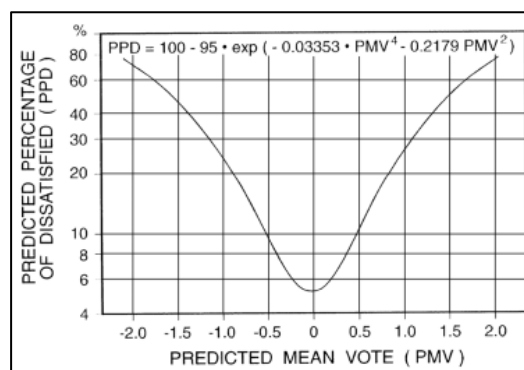


Figura 3.6 - Percentagem de insatisfeitos prevista em função da votação média prevista.
(Fonte: ASHRAE 55-2010)

Em baixo, a Figura 3.7 apresenta-se um gráfico psicrométrico, mostrando as faixas aceitáveis de temperatura e humidade para espaços que atendem os critérios para 1.1 met e 0.5 clo e 1.0 clo.

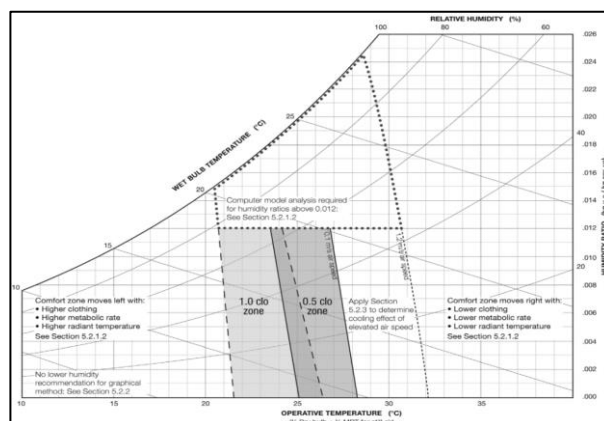


Figura 3.7 - Método Gráfico da Zona de Conforto (Fonte: ASHRAE 55-2010)

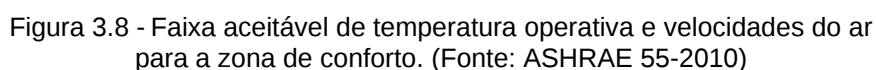
O termo *met*, de acordo com a literatura verificada em *ASHRAE Handbook 2021 Fundamentals* [24], *Typical Metabolic Heat Generation for Various Activities – Table 4* – o valor de 1.1 met corresponde a uma atividade sedentária.

$$1.0 \text{ met} = 58.1 \text{ W/m}^2.$$

O termo *clo* refere-se ao isolamento térmico que o vestuário promove, sendo que 0.5 *clo* é assumido como um valor genérico para vestuário associado à estação de arrefecimento e 1.0 *clo* para a estação de aquecimento.

Ainda com os dados encontrados em *ASHRAE Handbook 2021 Fundamentals, Typical Insulation and Permeability Values for Western Clothing Ensembles - Table 7*, o valor da resistência térmica para 1.0 *clo* é de 0.155 (m².K)/W.

Como este projeto apresenta diversas particularidades como a localização e o fornecimento de energia elétrica de forma limitada, pretende-se que a zona de conforto térmico dos seus hóspedes possa ser o mais à direita possível dos gráficos apresentados nas Figuras 3.7 e 3.8, permitindo que o consumo de energia seja o mais reduzido possível.



Para garantia da qualidade do ar interior dos espaços para os ocupantes é necessário que se realize a renovação de ar novo tratado, em condições de temperatura, humidade e velocidade do ar adequadas.

Para o efeito o ar exterior é insuflado na sua totalidade, através de UTAN - Unidades de Tratamento de Ar Novo, ou parcialmente, através de UTA – Unidades de Tratamento de Ar, garantindo a remoção de CO2 e de possíveis cargas poluentes.

Uma **UTA** funciona com ar novo, mas tem a possibilidade de fazer a recirculação de ar dentro de edifícios, Figura 3.9. Isto é possível para instalações com requisitos de qualidade do ar mais baixos, permitindo também, atingir poupanças a nível energético.

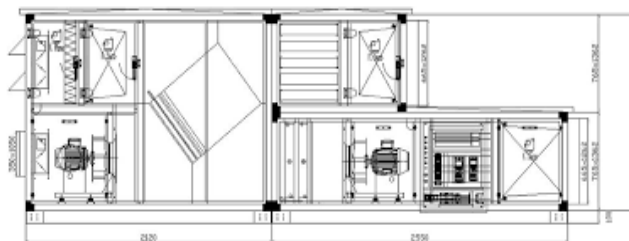


Figura 3.9 - Unidade de tratamento de ar.
(Fonte: docplayer.com.br/61729329-Unidades-de-
tratamento-de-ar-um-fato-a-medida.html)

Ao garantir a qualidade do ar interior através da insuflação exclusiva de ar novo do exterior em condições de temperatura e humidade ótimas, poderá originar num acréscimo de energia se as condições climáticas exteriores forem muito diferentes das pretendidas no interior.

3.5.1. Requisitos mínimos de Ar Novo (SBC)

Na tabela 2.3.3 da norma *SBC-501 Mechanical Requirements* [25], contempla os valores para a ocupação máxima estimada (por 100 m²) e o caudal de ar novo a ser insuflado. A Figura 3.10, apresenta o cabeçalho da tabela acima referida, e os valores existentes são referentes à ocupação máxima por cada 100m², caudais por ocupante, por área ou por tipologia de espaço, dependendo do tipo de espaço.

Table 2.3.3 Required Outdoor Ventilation Air		
Occupancy Classification	Estimated Maximum Occupant Load, (Persons Per 100 Square Meter ^a)	Outdoor Air (Liter Per Second Per Person) Unless Noted ^b

Figura 3.10 - Requisitos de caudais de Ar Novo – SBC5.
(Fonte: Tabela 2.3.3 / SBC 501)

Assim, para determinação do caudal mínimo de ar novo consulta-se o conteúdo da tabela acima mostrada, e, de acordo com o tipo de zona, retiram-se os valores de ar a ser insuflado do exterior. Determinado o caudal mínimo de ar novo, para cada espaço, verifica-se a sua eficiência quanto à distribuição do ar.

A eficiência de um sistema de distribuição de ar estará de acordo com a temperatura do ar a ser insuflado, e com a estratégia de insuflação. Não existindo na norma SBC valores para a efetividade da distribuição de ar, recorreu-se à Tabela 6-2 retirada da norma ASHRAE 62.1-2010 [26], como mostra a Tabela 3.12.

Tabela 3.12 - Eficiência da distribuição de ar.
(Fonte: Tabela 6-2 / ASHRAE 62.1-2010)

TABLE 6-2 Zone Air Distribution Effectiveness	
Air Distribution Configuration	E_z
Ceiling supply of cool air.	1.0
Ceiling supply of warm air and floor return.	1.0
Ceiling supply of warm air 15°F (8°C) or more above space temperature and ceiling return.	0.8
Ceiling supply of warm air less than 15°F (8°C) above space temperature and ceiling return provided that the 150 fpm (0.8 m/s) supply air jet reaches to within 4.5 ft (1.4 m) of floor level. <i>Note:</i> For lower velocity supply air, $E_z = 0.8$.	1.0
Floor supply of cool air and ceiling return provided that the 150 fpm (0.8 m/s) supply jet reaches 4.5 ft (1.4 m) or more above the floor. <i>Note:</i> Most underfloor air distribution systems comply with this proviso.	1.0
Floor supply of cool air and ceiling return, provided low-velocity displacement ventilation achieves unidirectional flow and thermal stratification.	1.2
Floor supply of warm air and floor return.	1.0
Floor supply of warm air and ceiling return.	0.7
Makeup supply drawn in on the opposite side of the room from the exhaust and/or return.	0.8
Makeup supply drawn in near to the exhaust and/or return location.	0.5

1. "Cool air" is air cooler than space temperature.
2. "Warm air" is air warmer than space temperature.
3. "Ceiling" includes any point above the breathing zone.
4. "Floor" includes any point below the breathing zone.
5. As an alternative to using the above values, E_z may be regarded as equal to air change effectiveness determined in accordance with ANSI/ASHRAE Standard 129¹² for all air distribution configurations except unidirectional flow.

Assim, ao valor obtido anteriormente, na Equação 9 calcula-se o caudal de ar novo corrigido a ser insuflado, da seguinte forma:

$$\text{Caudal de ar novo corrigido} = \text{Caudal de ar novo insuflado} / \text{Eficiência do sistema} \quad (9)$$

Como referido anteriormente, para uma correta ventilação dos espaços por forma a promover a remoção de CO₂ e de poluentes, recorreu-se à Tabela 2.3.3 da norma SBC 501, contendo os caudais mínimos de ar novo para cada tipo de zona, conforme o quadro a seguir, Tabela 3.13. Para o efeito os cálculos tiveram como base a soma dos caudais de ar novo por pessoa ou por área, em detrimento do cálculo de valores combinados.

Tabela 3.13 - Caudais mínimos de ar novo dos espaços interiores de Hotel, com base no SBC.

LOCAL	SBC 501	Área (m ²)	Pé Dto.	Volume (m ³)	OCUPAÇÃO		CAUDAIS MÍNIMOS DE AR NOVO						
					Ocupação máxima por 100 m ² SBC501	Ocupação para a área total	L/s.ocupante	L/s.espaco	L/s.m ²	L/s	m ³ /s	m ³ /h	ACH
Reception		60,00	3,50	210,00	64,00	38,00	7,50			282,50	0,293	1053,00	5,01
Lounge	Lounges	80,00	3,50	280,00	110,0	88,0	15,0			1320,0	1,320	4752,0	17,0
Dining	Dining rooms	110,00	3,50	385,00	75,0	83,0	10,0			830,0	0,830	2988,0	7,8
Administration offices/workstation		40,00	3,50	140,00	7,0	3,0	10,0			30,0	0,030	108,0	0,8
Toilets (por unidade)	Toilet rooms/b.g	40,00	3,50	140,00		0,0		17,0		17,0	0,017	61,2	0,4
Gym	Gymnasium	40,00	3,50	140,00	32,0	13	10			130,00	0,130	468,00	3,34
One Bedroom (60m ²)	Bedrooms	60,00	3,50	210,00		N/D		15		15,00	0,015	54,00	0,26
One Bedroom (80m ²)	Bedrooms	80,00	3,50	280,00		N/D		15		15,00	0,015	54,00	0,19
Kitchen	Kitchens (cooking)/f.g	80,00	3,50	280,00	21,0	17,00	7,5			127,50	0,128	459,00	1,64
Kitchen storage	Storage rooms	30,00	3,50	105,00					0,8	24,0	0,024	86,4	0,8
General Storage	Storage rooms	30,00	3,50	105,00					0,8	24,0	0,024	86,4	0,8
Laundry room	Commercial laundry	20,00	3,50	70,00	10,0	2	17			34,00	0,034	122,40	1,75
Staff toilets (por unidade)	Toilet rooms/b.g	30,00	3,50	105,00		0,0		17,0		17,0	0,017	61,2	0,6
Staff housing (Administration)	Dormitory sleeping areas	160,00	3,50	560,00	21,0	34,0	7,5			255,0	0,255	918,0	1,6
Staff housing (Labour)	Dormitory sleeping areas	80,00	3,50	280,00	21,0	17,0	7,5			127,5	0,128	459,0	1,6
Staff lounge and kitchenette		60,00	3,50	210,00	110,0	66,0	15,0			990,0	0,990	3564,0	17,0
Corredores	Corridors and utilities	1272,00	3,50	4452,00					0,26	330,72	0,331	1190,59	0,27

3.5.2. Requisitos de caudais mínimos de Ar Novo (ASHRAE)

Da norma *ASHRAE 62.1*, a Tabela 6-1, mostrada na Figura 3.11, apresenta os valores de insuflação de ar novo por pessoa e por área, podendo posteriormente conjugar-se estes dois fatores, e a ocupação máxima estimada (por 100 m²), podendo este ser dado ou ser estimado. Estes valores serão atribuídos consoante o tipo de área.

TABLE 6-1 MINIMUM VENTILATION RATES IN BREATHING ZONE (Continued)						
(This table is not valid in isolation; it must be used in conjunction with the accompanying notes.)						
Occupancy Category	People Outdoor Air Rate		Area Outdoor Air Rate		Default Values	
	R_p		R_a		Occupant Density (see Note 4)	
	cfm/person	L/s/person	cfm/ft ²	L/s-m ²	#/1000 ft ² or #/100 m ²	Combined Outdoor Air Rate (see Note 5)
						cfm/person L/s/person

Figura 3.11 - Requisitos mínimos de insuflação de Ar Novo.
(Fonte: Tabela 6-1 / ASHRAE 62.1)

Após consultada a tabela acima e determinados os caudais mínimos de ar novo a serem insuflados nos espaços, será verificada a sua eficiência, da mesma forma que consta no capítulo 3.5.1. Requisitos mínimos de Ar Novo (SBC), através da tabela 6-2 da norma *ASHRAE 62.1*. A sua eficiência resultou no valor 1, sendo que o ar frio está a ser insuflado pelo teto e a extração também. A Tabela 3.14 apresenta os caudais mínimos de ar novo para cada zona.

Tabela 3.14 - Caudais mínimos de Ar Novo dos espaços interiores de Hotel, com base na ASHRAE.

LOCAL	ASHRAE 62-2010 denom.	Área	Pé Dto	Volume	OCUPAÇÃO		CAUDAIS MINIMOS DE AR NOVO				
					Ocupação por 100 m ² ASHRAE	Ocupação para a área total	L/s. ocupante	L/s. m ²	L/s	m ³ /s	ACH
Reception	Reception areas	60,0	3,5	210,0	20	12	2,5	0,3	48,0	0,048	0,82
Lounge	Breakrooms	80,0	3,5	280,0	25	20	3,8	0,9	148,0	0,148	1,90
Dinning	Restaurant dining rooms	110,0	3,5	385,0	70	77	3,8	0,9	391,6	0,392	3,66
Administration offices/workstation	Office space	40,0	3,5	140,0	5	2	2,5	0,3	17,0	0,017	0,44
Toilets		40,0	3,5	140,0		0	0,0				0,00
Gym	Gym, stadium (play area)	40,0	3,5	140,0	30	12	0	1,50	60	0,060	1,54
One Bedroom (60m ²)	Bedroom/living room	60,0	3,5	210,0	2 por quarto	2	2,5	0,30	23	0,023	0,39
One Bedroom (80m ²)	Bedroom/living room	80,0	3,5	280,0	2 por quarto	2	2,5	0,30	29	0,029	0,37
Kitchen	Kitchen (cooking)	80,0	3,5	280,0	10	8	3,8	0,60	78,4	0,078	1,01
Kitchen storage	Occupiable storagem rooms for dry	30,0	3,5	105,0	2	1	2,5	0,3	10,5	0,011	0,36
General Storage	Occupiable storagem rooms for dry	30,0	3,5	105,0	2	1	2,5	0,3	10,5	0,011	0,36
Laundry room	Laundry rooms, central	20,0	3,5	70,0	10	2	2,5	0,60	17	0,017	0,87
Staff toilets		30,0	3,5	105,0		0					0,00
Staff housing (Administration)	Dwelling unit	160,0	3,5	560,0	15	24	2,5	0,3	108,0	0,108	0,69
Staff housing (Labour)	Dwelling unit	80,0	3,5	280,0	15	12	2,5	0,3	54,0	0,054	0,69
Staff lounge and kitchenette	Bars, cocktail lounges	60,0	3,5	210,0	100	60	3,8	0,9	282,0	0,282	4,83
Corridor	Corridors	1272,00	3,50	4452,00		0	0	0,30	381,6	0,382	0,31

3.5.3. Comparativo de requisitos (SBC / ASHRAE)

No seguimento dos dois subcapítulos anteriores verificou-se uma diferença nas necessidades de caudais de Ar Novo a serem insuflados nos espaços constituintes do Hotel, entre ambas as normas.

Em baixo, na Tabela 3.15, apresenta-se um comparativo dos caudais mínimos de Ar Novo entre as normas SBC e ASHRAE.

Tabela 3.15 - Quadro comparativo de caudais de ar novo das normas SBC e ASHRAE.

Dados		Requisitos SBC			Requisitos SBC		
<i>Espaço</i>	<i>Área</i>	<i>L/s</i>	<i>ACH</i>	<i>Ocupação</i>	<i>L/s</i>	<i>ACH</i>	<i>Ocupação</i>
<i>Recepção + Escritórios</i>	100	112,5	1,16	25	26,7	0,27	9
<i>Instalações Sanitárias</i>	70	10,2	0,15	0	0,0	0,00	0
<i>Restaurante + Lounge (Clientes e Pessoal)</i>	250	615,1	2,53	143	215,5	0,89	95
<i>Acomodações de pessoal + administração</i>	240	127,8	0,55	31	67,6	0,29	22
<i>Quartos de cliente</i>	80	9,0	0,12	2	21,8	0,28	2
<i>Armazém</i>	60	14,4	0,25	0	7,9	0,14	2
<i>Ginásio</i>	40	78,0	2,01	8	45,0	1,16	8
<i>Cozinha</i>	80	76,5	0,98	10	58,8	0,76	5
<i>Lavandaria</i>	20	20,4	1,05	2	12,8	0,66	2
<i>Corredor</i>	1272	198,4	0,16	0	286,2	0,23	0

Verifica-se, portanto, que devido à diferença de requisitos entre as normas apresentadas, nomeadamente da ocupação por cada 100m² e dos caudais mínimos por espaço e por pessoa, as necessidades de Ar Novo, são também diferentes, constatando-se que as necessidades de ventilação presentes na norma ASHRAE são inferiores devido aos factos anteriormente mencionados. Esta diferença poderá também influenciar os consumos de energia final, como já explanado no último parágrafo do Capítulo 3.5.

Capítulo 4

Caso de estudo, Edifício tipo – Hotel

4.1. Localização

O presente caso de estudo está situado num *resort* localizado em Riade, na Arábia Saudita, mais propriamente nas coordenadas 24,70° N, 46,73 E, Figura 4.1.



Figura 4.1 - Localização Riade, Arábia Saudita.

O clima neste local é caracterizado por um verão longo, escaldante e árido, e por um inverno ameno e seco. Durante o ano inteiro, o tempo é de céu quase sem nuvens.

Conforme mostra a Figura 4.2, ao longo do ano em geral a temperatura varia de 9 °C a 43 °C e raramente é inferior a 5 °C ou superior a 45 °C. Com base nos dados climáticos da região, é considerado pela ASHRAE como quente e seco, pertencendo à região climática 1B.

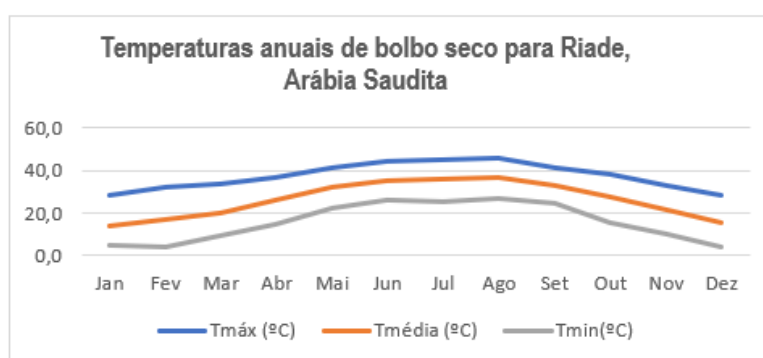


Figura 4.2 - Temperaturas anuais exteriores de bolbo seco para Riade, Arábia Saudita.
(Fonte: Construído pelo autor baseado no ficheiro *epw* – *EnergyPlus Weather file*)

4.2. Descrição

Este projeto é referente ao estudo de otimização energética para conforto ambiente com tecnologias passivas e ativas para edifício tipo em *eco resort* situado na Arábia Saudita.

Localizado na Reserva Real do Rei Abdulaziz, Figura 4.3, com cerca de 28,136 km², o projeto de implementação divide-se em duas zonas principais do programa, o resort e a vila, com uma área 4.9 milhões de m² e de 100 mil m², respetivamente.



Figura 4.3 - *Eco resort*.

O *eco resort*, devido a estar integrado na Reserva Real do Rei Abdul Aziz está abrangido por diversos regulamentos e restrições que inclui a proibição de atos como o abate de árvores, poluição, caça e pastagem em excesso.

Assim, a estratégia do projeto assenta na minimização do impacto natural e ambiental da envolvente, através de técnicas e sistemas inteligentes e inovadoras.

Como critérios deste projeto pretende-se uma atmosfera dinâmica com diversas atividades desportivas, escritórios, restauração, lazer, tendas e um hotel num ambiente de luxo.

Os edifícios serão dispersos pelo resort e vila e a sua operacionalidade pretende ser apenas durante o período do verão, na estação de arrefecimento.

Ainda sobre os dois complexos, vila e resort, o primeiro estará perto da estrada servindo de ponto de acesso e controlo, e o segundo, acolhendo todas as atividades, experiências desenhadas e principais modelos de hospitalidade.

As atividades deste *eco resort* são de cariz familiar, onde se podem deslocar ao deserto para ter uma experiência em comunidade a natureza. Para quem se desloca ao *eco resort* e queira mais conforto poderá ficar hospedado no edifício hotel.

4.3. Pressupostos

Apesar de existirem alguns edifícios dentro do *resort*, este trabalho cinge-se apenas no estudo do edifício hotel devido à sua dimensão e às suas características de conforto. A parte passiva resultante deste estudo poderá ser replicada para todo o *resort*, minimizando os consumos de energia.

Com uma área de aproximadamente 4.300 m² é composto por um único piso térreo, dispõe de cobertura exterior horizontal e as fachadas do edifício são compostas por vãos de sacada.

A verificação do impacto das soluções na redução do consumo de energia será efetuada através do programa de simulação energética *Design Builder*.

Como requisitos normativos, foram consultados e retirados da norma SBC, e dos seus cadernos 501 e 601, para requisitos mecânicos e de conservação da energia respetivamente. Posteriormente, comparou-se a melhor solução SBC com outra solução, tendo como base a ASHRAE 90.1.

4.4. Etapas da simulação

Este subcapítulo descreve as diversas etapas necessárias desde o início do estudo até ao seu resultado.

Etapa 1

- Consulta dados do projeto do local em estudo;
- Inserção de dados de projeto ao nível do *Site (Design Builder)*;
- Procura e carregamento do ficheiro *EPW (EnergyPlus Weather file)*.

Etapa 2

- Consulta dos requisitos de construção, de conservação de energia e de requisitos de aspetos mecânicos do edifício de acordo o regulamento local (SBC, SBC 601, SBC 501).

Etapa 3

- Modelação do edifício:
 - Construção do edifício no programa de simulação energética;
 - Alinhamento geográfico do edifício;
 - Definição de envolvente opaca e não opaca (SBC e ASHRAE), para as diversas soluções;
 - Densidades de potência para iluminação (SBC e ASHRAE) e equipamentos de escritório e diverso (ASHRAE);

- Definição de perfis de ocupação de pessoas, e utilização de equipamentos e iluminação (*Design Builder*);
- Definição dos caudais mínimos de Ar Novo (SBC e ASHRAE).

Etapas 4

- Determinação das soluções construtivas da envolvente térmica do edifício com alterações à sua inércia térmica (modulação de ganhos de calor).

Etapas 5

- Verificação e escolha de melhor solução construtiva (simulação *Cooling Design + Simulation*), como técnica de arrefecimento passivo.

Etapas 6

- Alteração dos sistemas ativos e realização das respetivas simulações para verificação dos mais eficientes. (*Cooling Design + Simulation*).

Etapas 7

- Aplicação de melhorias com base na literatura consultada (técnicas de arrefecimento passivo, adicionais à inércia térmica - *Cooling Design + Simulation*).
- Escolha da(s) técnica(s) de arrefecimento passivo adicional(ais) com um maior impacto na redução de potências de projeto para arrefecimento e dos consumos energéticos dos sistemas ativos. (*Cooling Design + Simulation*).

Etapas 8

- Comparação de consumos de energia final referentes aos requisitos aplicados pelas normas SBC e ASHRAE, com o sistema mais eficiente.

4.5. Dados de projeto

4.5.1. Dados climáticos e psicrométricos

Este subcapítulo visa o fornecimento de dados climáticos e psicrométricos para a localização Riade, Arábia Saudita.

Em baixo, na Figura 4.4, mostra o gráfico relativo ao local, apresentando os valores médios relativos à temperatura exterior de bolbo seco e bolbo húmido, à velocidade e direção do vento, azimute e altitude solar, pressão atmosférica e incidência solar direta e difusa.

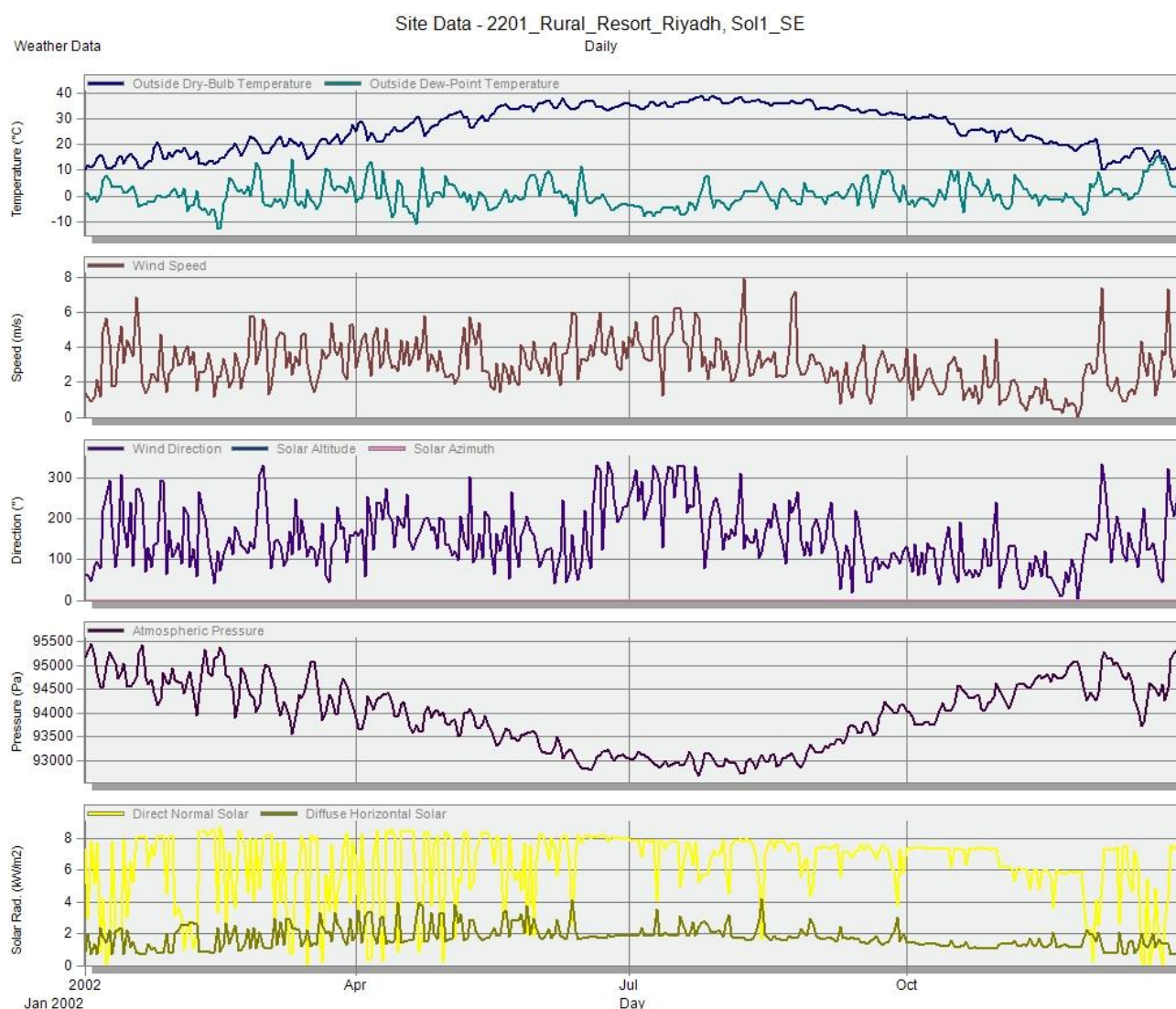


Figura 4.4 - Dados climáticos de Riade, Arábia Saudita. (Fonte: Retirado da simulação ao nível do *Site-Design Builder*)

Na Tabela 4.1, apresentam-se os dados psicrométricos para a localidade em estudo, Riade, Arábia Saudita.

Tabela 4.1 - Dados de projeto.

Designação	Dados de projeto
Localização	Riade, Arábia Saudita
Latitude	24,70
Longitude	46,73
Zona climática – ASHRAE	1B (Clima quente e seco)
Altitude	635 m
Dados climáticos (ASHRAE)	SAU_Riyadh.404380_IWEC.epw
Graus dia arrefecimento	3429 (SBC)
Graus dia aquecimento	254 (SBC)
Graus dia	3800 (SBC) (arredondado)
DADOS PSICROMÉTRICOS – (NC 99.6%)	
ESTAÇÃO DE AREFECIMENTO – VERÃO	
Temperatura exterior máxima de bolbo seco	44.9 °C (ASHRAE)
Temperatura exterior de bolbo húmido coincidente	19,5 °C (ASHRAE)
Temperatura exterior mínima de bolbo seco	31,5 °C (ASHRAE)
ESTAÇÃO DE AQUECIMENTO – INVERNO	
Temperatura exterior de projeto	5,8 °C (ASHRAE)

Os dados psicrométricos de projeto foram obtidos com um Nível de Confiança de 99.6%.

4.6. Modelação do edifício

4.6.1. Geometria do edifício

De acordo com documentação disponível, apresentou-se uma proposta para a geometria. O edifício apresenta-se com apenas um piso ao nível do solo, de cobertura plana, sendo constituído por quartos de hóspedes, acomodações de pessoal, zonas de lazer, instalações sanitárias, zonas técnicas e de produção.

Em baixo, na Figura 4.5, seguem as versões original e modelo para simulação, de acordo com a sua dimensão e orientação geográfica. O edifício encontra-se com uma rotação a 45° face à orientação Norte.

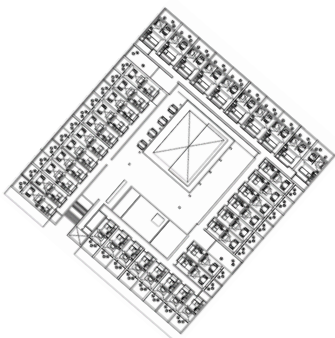
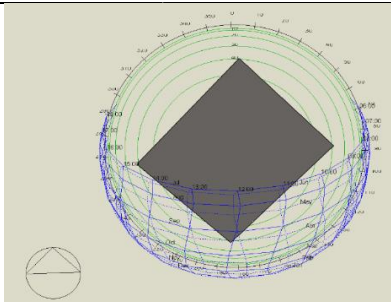
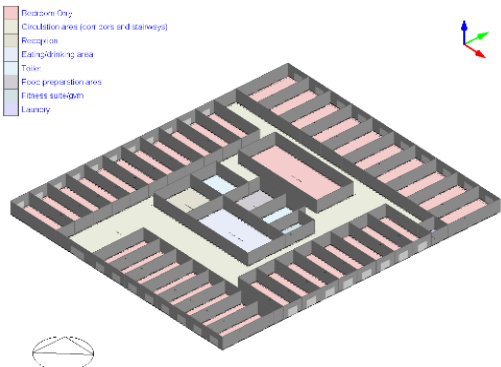
	Configuração do edifício de acordo com a imagem fornecida
	Edifício com vista exterior <i>Design Builder</i> (<i>Visualize > Rendered</i>)
	Edifício (vista interior) – <i>Design Builder</i>

Figura 4.5 - Vistas do espaço tipo, Hotel.

Na Tabela 4.2 figuram os espaços no interior do edifício e as respetivas áreas.

Tabela 4.2 - Espaços interiores do edifício Hotel.

Espaço	Quantidade	Área (m ²)
Quarto (Nordeste)	10	80
Quarto (Sudeste)	7	60
Quarto (Noroeste)	11	60
Quarto (Sudoeste)	8	60
Receção	1	60
Lounge	1	80
Restaurante	1	110
Escritórios de Administração / Administrativos	1	40
Instalações sanitárias públicas	1	40
Ginásio	1	40
Cozinha	1	80
Armazém de cozinha	1	30
Armazém geral	1	30
Lavandaria	1	20
Instalações sanitárias (pessoal)	1	30
Habitação Administração	1	160
Habitação do pessoal	1	80
Lounge e kitchete do pessoal	1	60
Corredores	1	1272

Por razões de simulação energética, e de acordo com o manual do *EnergyPlus*, é possível proceder a uma simplificação de zonas térmicas que tenham perfis de ocupação e utilização semelhantes e desde que não ultrapassem uma área de 250 m².

Assim, procedeu-se à simplificação apenas para algumas zonas, de acordo com a Tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Agrupamento de espaços com as mesmas características

<i>Espaço simplificado</i>	Área
<i>Receção + Escritórios</i>	100
<i>Instalações sanitárias</i>	70
<i>Restaurante + Lounge + Lounge e Kitchenette pessoal</i>	250
<i>Habitação Administração / Pessoal</i>	240
<i>Quartos</i>	60
<i>Armazém</i>	60
<i>Ginásio</i>	40
<i>Cozinha</i>	80
<i>Lavandaria</i>	20
<i>Corredor</i>	1 272

Como resultado do paragrafo anterior, ficaram agregados os seguintes espaços:

- Recepção + Escritórios,
- Instalações Sanitárias (públicas e de pessoal),
- Restaurante + Lounge + Lounge e Kitchenette pessoal,
- Armazém de cozinha+ Armazém geral.

4.6.2. Temperaturas de Setpoint e Setback

As temperaturas de *setpoint* são temperaturas definidas pelo sistema ou pelo utilizador para o funcionamento dos sistemas de climatização que terão de atingir enquanto existe ocupação.

As temperaturas de *setback*, são temperaturas definidas quando não existe ocupação, com um valor que não corresponde à temperatura de conforto, contudo, permite que a temperatura no interior dos espaços esteja controlada, evitando sobreaquecimentos, neste caso.

Assim, na Tabela 4.4, as temperaturas de *setpoint* e *setback* ficaram definidas da seguinte forma.

Tabela 4.4 - Temperaturas de *setpoint* e *setback*.

<i>Espaço simplificado</i>	<i>Temperatura arrefecimento Setpoint (° C)</i>	<i>Temperatura arrefecimento Setback (° C)</i>
<i>Recepção + Escritórios</i>	23	28
<i>Instalações Sanitárias</i>	25	28
<i>Restaurante + Lounge + Lounge e Kitchenette pessoal</i>	25	28
<i>Habitação administração / pessoal</i>	25	28
<i>Quartos</i>	25	28
<i>Armazém</i>	23	28
<i>Ginásio</i>	25	28
<i>Cozinha</i>	21	28
<i>Lavandaria</i>	27	28
<i>Corredor</i>	23	28

As temperaturas de *setpoint* e *setback* mostradas no quadro em cima, são as por defeito do software *DesignBuilder* de acordo com o *template* de atividade dos espaços.

4.6.3. Ganhos de calor (de origem interna)

Os ganhos de calor internos emitidos pelos elementos do edifício, nomeadamente da ocupação máxima por pessoas, dos equipamentos de escritório, dos equipamentos diversos e da iluminação, são indispensáveis ao dimensionamento de um sistema de climatização.

Para que se pudessem adicionar os ganhos de calor de equipamentos dos espaços e não existindo qualquer informação acerca dos mesmos, recorreu-se à *ASHRAE Handbook Fundamentals*.

Estes valores serão utilizados nas simulações dos espaços para ambas as normas.

Em baixo, seguem as potências e quantidades dos equipamentos que compõem os diversos espaços, da Tabela 4.5 à Tabela 4.11.

Receção e escritório

Tabela 4.5 - Ganhos de calor internos Receção e escritório.

EQUIPAMENTOS	Tipo de equipamentos	Ganhos de calor (W)	Quantidade	Ganhos de calor total (W)
Desktop	Escritório	97	5	485
Monitor	Escritório	90	5	450
Impressora	Escritório	130	3	390
			Total	1 325
Ocupação SBC	25		Ocupação ASHRAE	9
Iluminação SBC (W/m ²)	10		Iluminação ASHRAE (W/m ²)	9.4

Restaurante + Lounge + Lounge e Kitchenette pessoal

Tabela 4.6 - Ganhos de calor internos Restaurante + Lounge + Lounge e Kitchenette pessoal.

EQUIPAMENTOS	Tipo de equipamentos	Ganhos de calor (W)	Quantidade	Ganhos de calor total (W)
Desktop	Escritório	97	2	194
Monitor	Escritório	90	2	180
Impressora	Escritório	130	2	260
Máquina café expresso	Diversos	352	2	704
Equipamento de alimentos frios	Diversos	960	2	1 920
Máquina de aperitivos	Diversos	275	2	550
Water Cooler	Diversos	275	1	275
			Total	4 083
Ocupação SBC	143		Ocupação ASHRAE	95
Iluminação SBC (W/m ²)	10		Iluminação ASHRAE (W/m ²)	9.4

Quarto (Hóspedes)

Tabela 4.7 - Ganhos de calor internos Quarto (Hóspedes).

EQUIPAMENTOS	Tipo de equipamentos	Ganhos de calor (W)	Quantidade	Ganhos de calor total (W)
DESKTOP	Escritório	97	1	97
MONITOR	Escritório	90	1	90
IMPRESSORA	Escritório	130	1	130
			Total	317
Ocupação SBC	2		Ocupação ASHRAE	2
Iluminação SBC (W/m ²)	10		Iluminação ASHRAE (W/m ²)	9.4

Ginásio

Tabela 4.8 - Ganhos de calor internos Ginásio.

EQUIPAMENTOS	Tipo de equipamentos	Ganhos de calor (W)	Quantidade	Ganhos de calor total (W)
DESKTOP	Escritório	97	1	97
MONITOR	Escritório	90	1	90
IMPRESSORA	Escritório	130	1	130
COLD FOOD BEVERAGE	Diversos	960	1	960
SNACK	Diversos	275	1	275
WATER COOLER	Diversos	350	1	350
			Total	1902
Ocupação SBC	8		Ocupação ASHRAE	8
Iluminação SBC (W/m ²)	10		Iluminação ASHRAE (W/m ²)	9.4

Cozinha

Tabela 4.9 - Ganhos de calor internos Cozinha.

EQUIPAMENTOS	Tipo de equipamentos	Ganhos de calor (W)	Quantidade	Ganhos de calor total (W)
FORNO GRANDE	Diversos	1964	1	1964
FRITADEIRA	Diversos	821	1	821
FOGÃO 6 ELEMENTOS	Diversos	9730	1	9730
COZEDURA DE MASSAS	Diversos	2491	1	2491
COZEDURA A VAPOR	Diversos	528	1	528
GRELHADOR	Diversos	3370	1	3370
MAQ. KAV LOICA	Diversos	1670	1	1670
MICROONDAS	Diversos	822	1	822
			Total	21396
Ocupação SBC	10		Ocupação ASHRAE	5
Iluminação SBC (W/m ²)	10		Iluminação ASHRAE (W/m ²)	9.4

Armazém

Tabela 4.10 - Ganhos de calor internos Armazém.

EQUIPAMENTOS	Tipo de equipamentos	Ganhos de calor (W)	Quantidade	Ganhos de calor total (W)
Sem equipamentos	-	-	-	-
Ocupação SBC	S/ocupação		Ocupação ASHRAE	1
Iluminação SBC (W/m ²)	10		Iluminação ASHRAE (W/m ²)	9.4

Lavandaria

Tabela 4.11 - Ganhos de calor internos Lavandaria.

EQUIPAMENTOS	Tipo de equipamentos	Ganhos de calor (W)	Quantidade	Ganhos de calor total (W)
Equipamentos enviam o calor diretamente para o exterior (SBC)	Sem equipamentos	0	0	0
Ocupação SBC	2		Ocupação ASHRAE	2
Iluminação SBC (W/m ²)	10		Iluminação ASHRAE (W/m ²)	9.4

De seguida, na Tabela 4.12, resumem-se os valores dos requisitos das 2 normas, já apresentados nos quadros anteriores.

Tabela 4.12 - Resumo ganhos de calor internos espaços Hotel. De acordo com SBC e ASHRAE.

Espaço	Ocupação SBC	Ocupação ASHRAE	Equipamentos de escritório (W/m ²)	Equipamento diverso (W/m ²)	Iluminação SBC (W/m ²)*	Iluminação ASHRAE (W/m ²)**
Receção e escritório	25	9	12,36	n/a	10	9.4
Instalações sanitárias	s/ ocupação	s/ ocupação	0,00	0,00	10	9.4
Restaurante + Lounge + Lounge e Kitchenette pessoal	143	95	3,42	17,00	10	9.4
Habitação Administração / Pessoal	31	22	5,00	0,00	10	9.4
Quarto (cada)	2	2	5	n/a	10	9.4
Armazém	s/ ocupação	1	0,00	0,00	10	9.4
Ginásio	8	8	7,93	39,63	10	9.4
Cozinha	10	5	0,00	267,45	10	9.4
Lavandaria	2	2	0,00	0,00	10	9.4
Corredor	s/ocupação	s/ ocupação	0	0	10	9.4

*) Foi adotado o método simplificado da SBC501.

**) Foi adotado o método simplificado da ASHRAE.

As potências dos equipamentos foram retiradas do livro ASHRAE *Handbook Fundamentals*.

Para a densidade de potência de iluminação adotou-se o sistema simplificado, devido ao projeto estar ainda numa fase de estudo em que não existe projeto da especialidade, adotando o autor uma posição conservadora. No futuro, estes valores poderão decrescer usando tecnologias de iluminação mais eficientes.

4.6.4. Perfis

Os perfis de ocupação e funcionamento são imprescindíveis para a simulação energética de um edifício. Estes conferem os ganhos de calor internos, que em conjunto com os ganhos ou perdas de calor, pelo e para o exterior, dão mais dados ao programa de modelação energética para conferir uma maior aproximação das necessidades térmicas do modelo ao edifício real.

Os perfis de ocupação / funcionamento adotados para cada espaço estão considerados nos seguintes gráficos, da Figura 4.6 à Figura 4.10.

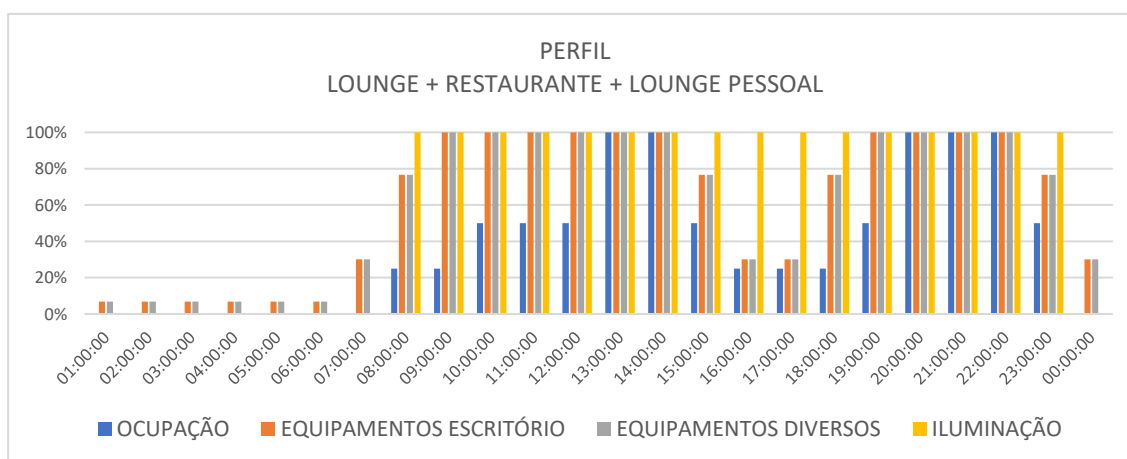


Figura 4.6 - Perfil Lounge, Restaurante, Lounge e Kitchenette pessoal.

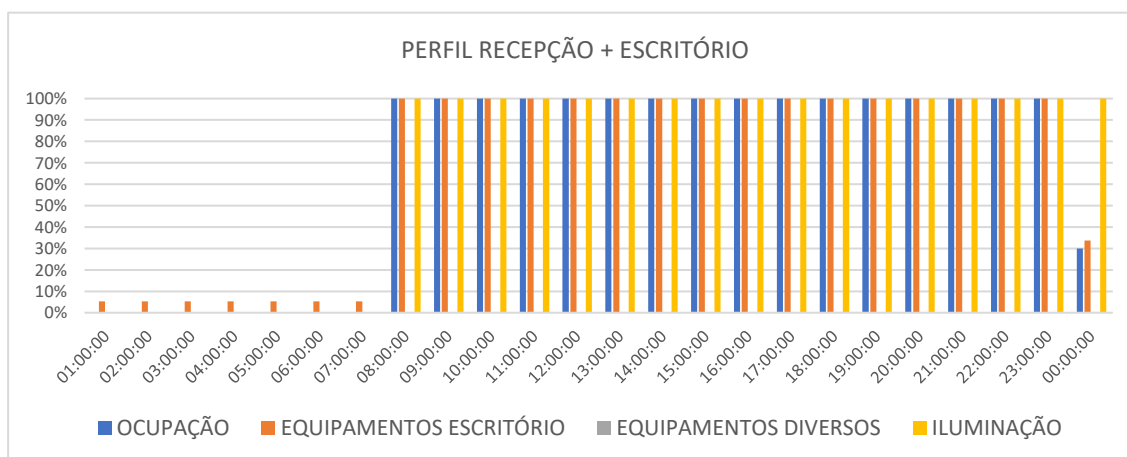


Figura 4.7 - Perfil Recepção + Escritório

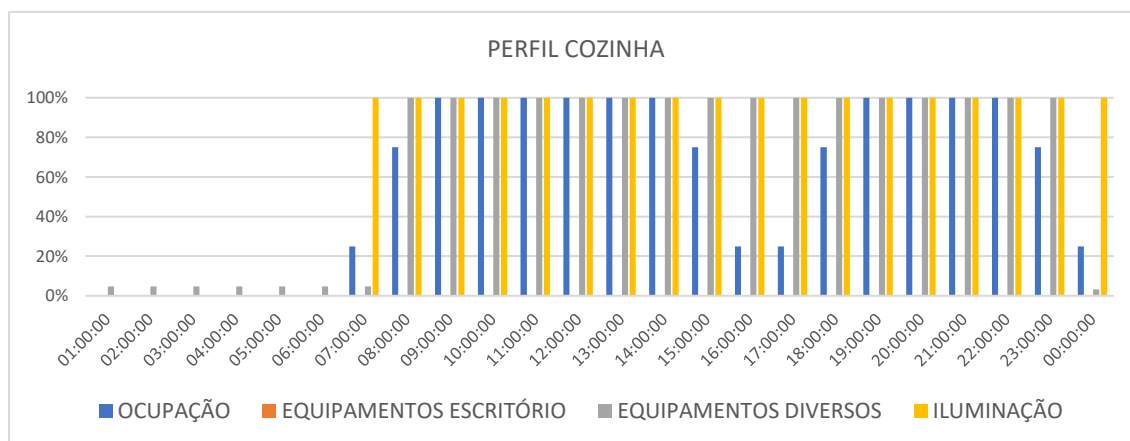


Figura 4.8 – Perfil Cozinha

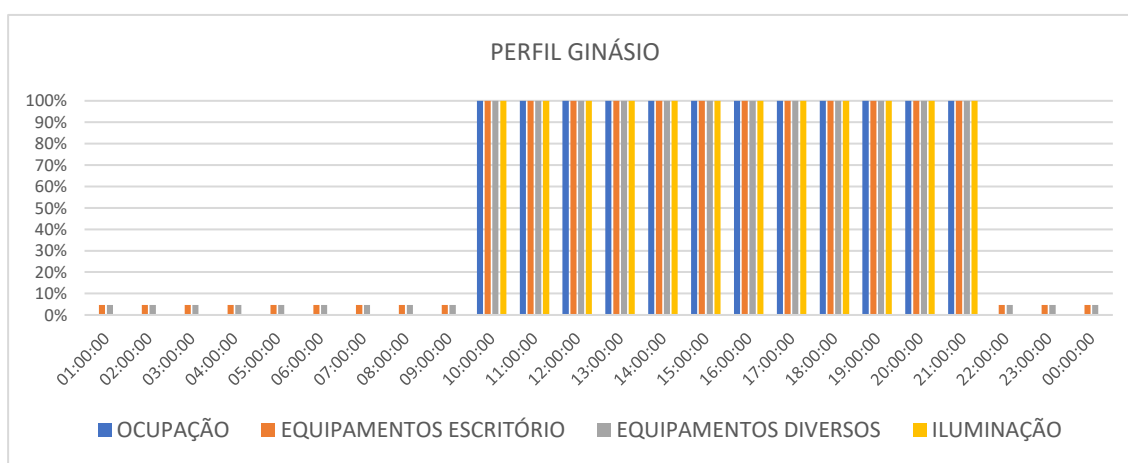


Figura 4.9 - Perfil Ginásio.

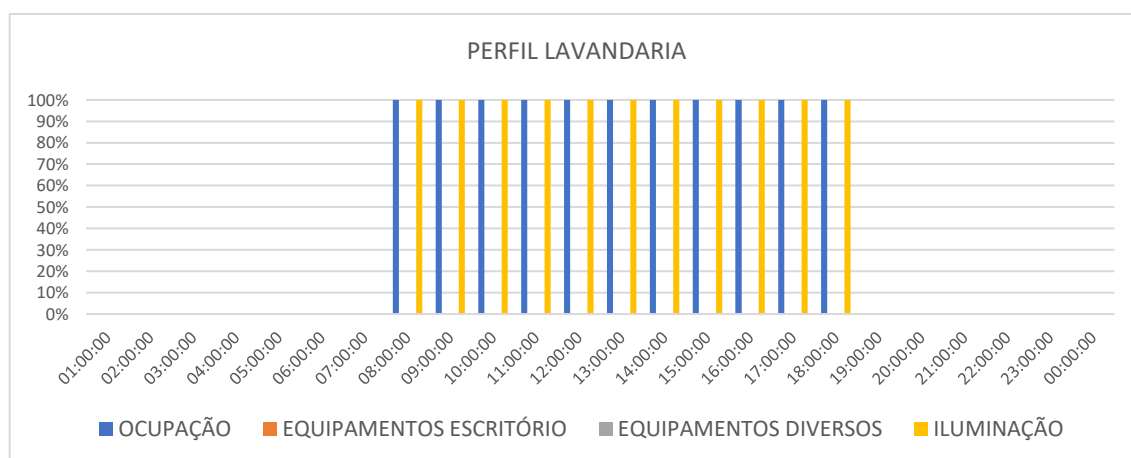


Figura 4.10 – Perfil Lavandaria.

4.7. Soluções construtivas

Numa primeira fase, após consulta dos requisitos da envolvente térmica dos edifícios no regulamento local, SBC, aferiu-se o desempenho de quatro soluções construtivas de acordo com as suas características.

As soluções construtivas apresentam o mesmo coeficiente de transmissão térmica para os elementos construtivos, embora se tenha feito variar a sua massa total, e consequentemente, a sua inércia térmica.

Conforme descrito no Capítulo 3.1.3, o quadro a seguir apresentado na Tabela 4.13, resume os valores de coeficiente de transmissão térmica dos elementos construtivos.

Tabela 4.13 - Dados envolvente térmica de acordo com as normas SBC 601 e ASHRAE 90.1.

SBC 601 – Energy Conservation Requirements		ASHRAE 90.1
Solução construtiva	U(W/m ² .°C)	U(W/m ² .°C)
Cobertura	0.12 (R-8.6)	0.04 (R-25)
Paredes externas	0.217 (R-4.63)	0.151 (R- 5.7)
Pavimento em contacto com o exterior	0.27 (R-3.7)	0.322 (R- 3.11)
Pavimento em contacto com o solo	0.55(R-1.8 – 1.2m)	Sem isolamento
Envidraçados verticais	1.70 (WWR 18% - 20%)	1.10 (WWR 0%-40%)
SHGC	0.25	0.25

Como soluções construtivas, decidiu-se abordar 2 tipos de construção no seu interior. Pelo exterior, nas paredes externas e cobertura, o edifício apresenta-se com as mesmas soluções construtivas. No interior, como paredes de compartimentação, duas das soluções apresentam-se com um pano de alvenaria sem isolamento com estuque de ambos os lados, e nas outras duas soluções as paredes interiores são em taipa, material usado na construção de edifícios no Sudão e Arábia Saudita formada por materiais sustentáveis como o argila e adobo. [27]

Ainda para cada tipo de solução construtiva, optou-se pela aplicação de diversos tipos de revestimento nas superfícies por forma a verificar a sua influência no desempenho energético de cada uma das soluções.

Na Tabela 4.14 apresentam-se os elementos construtivos e as suas camadas, resultantes das 4 soluções construtivas testadas no *software* de simulação energética para um espaço de referência, um quarto com 60 m².

Posteriormente, na Tabela 4.15 e Tabela 4.16, apresentam-se os valores de inércia térmica e da massa total das soluções construtivas, respetivamente.

As quatro soluções construtivas têm as seguintes constituições.

Tabela 4.14 - Quadro resumo das soluções construtivas.

Paredes Exteriores				
Camadas (do exterior para o interior)	Solução 1	Solução 2	Solução 3	Solução 4
Pano de blocos de betão normal (m)	0,15	0,15	0,15	0,15
Isolamento XPS (m)	0,11	0,11	0,11	0,11
Pano de betão leve (m)	0,15	0,15	0,15	0,15
Estuque tradicional (m)	0,015	0,015	0,015	0,015
Inércia térmica (kg/m ² .pavimento)	31,25	31,25	31,25	31,25
Massa superficial útil (kg)	2 812,5	2 812,5	2 812,5	2 812,5
Cobertura				
Camadas (do exterior para o interior)	Solução 1	Solução 2	Solução 3	Solução 4
Camada de asfalto impermeabilizante (m)	0,01	0,01	0,01	0,01
Isolamento XPS (m)	0,25	0,27	0,27	0,27
Camada de regularização – betão de inertes poliestireno expandido (m)	0,1	0,1	0,1	0,1
Betão normal (m)	0,2	0,2	0,2	0,2
Caixa de ar (m)	0,1	N/A	N/A	N/A
Placa de gesso cartonado (m)	0,012	N/A	N/A	N/A
Inércia térmica (kg/m ² .pavimento)	5,10	150	150	150
Massa superficial útil (kg)	306	29 400	29 400	29 400
Pavimento em contacto com o solo				
Camadas (do exterior para o interior)	Solução 1	Solução 2	Solução 3	Solução 4
Laje de betão com armadura <1% (em volume)	0,1	0,1	0,1	0,1
Madeira semi-densa	0,03	0,03	0,03	N/A
Betão normal	N/A	N/A	N/A	0,03
Inércia térmica (kg/m ² .pavimento)	75	75	75	150
Massa superficial útil (kg)	15 283,5	15 283,5	15 283,5	21 450
Paredes de compartimentação				
Camadas (do exterior para o interior)	Solução 1	Solução 2	Solução 3	Solução 4
Estuque tradicional (m)	0,02	0,02		
Alvenaria furado normal (m)	0,15	0,15		
Estuque tradicional (m)	0,02	0,02		
Taipa (m)			0,5	0,5
Inércia térmica (kg/m ² .pavimento)	93,63	93,63	210	210
Massa superficial útil (kg)	5 617,5	5 617,5	39 585	39 585

Tabela 4.15 - Quadro resumo da inércia térmica das soluções construtivas.

Inércia térmica das construções				
Elemento construtivo	Solução 1	Solução 2	Solução 3	Solução 4
Paredes exteriores (kg/m² pavimento)	31,25	31,25	31,25	31,25
Cobertura (kg/m².pavimento)	5,10	150	150	150
Pavimento em contacto com o solo (kg/m².pavimento)	75	75	75	150
Paredes compartimentação (kg/m².pavimento)	93,63	93,63	210	210
Total (kg/m².pavimento)	205	350	466	541
Classe da inércia térmica*	Média	Média	Forte	Forte

*) Classificação da inércia térmica de acordo com o Despacho n.º 6476-H/2021, de 1 de julho.

Tabela 4.16 - Resumo das massas totais.

Massas totais das construções				
Elemento construtivo	Solução 1	Solução 2	Solução 3	Solução 4
Paredes exteriores (kg)	2 812,50	2 812,50	2 812,50	2 812,50
Cobertura (kg)	306,00	29 400,00	29 400,00	29 400,00
Pavimento em contacto com o solo (kg)	15 283,50	15 283,50	15 283,50	21 450,00
Paredes de compartimentação (kg)	5 617,50	5 617,50	39 585,00	39 585,00
Total massa superficial	24 019,50	53 113,50	87 081,00	93 247,50

No capítulo 5, verificar-se-á como as características referentes à inércia térmica, como técnica de arrefecimento passivo, influenciam a eficiência nos consumos de energia.

4.8. Técnicas de arrefecimento passivo

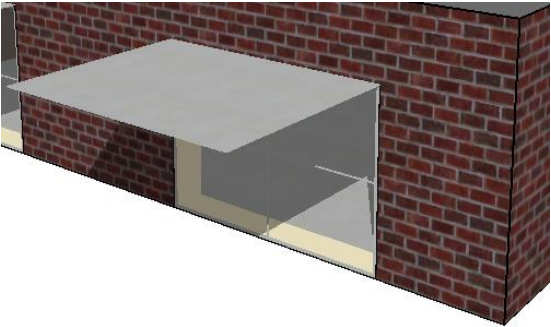
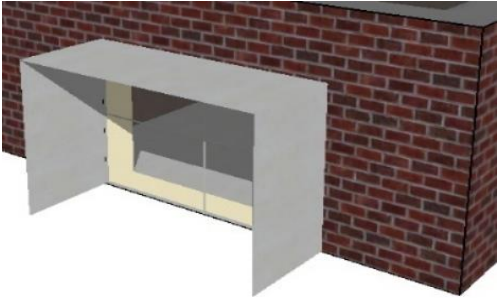
Esta fase é caracterizada pela apresentação das medidas de arrefecimento passivo. Para o efeito, recorreu-se à literatura encontrada, e, apesar de existirem diversas estratégias associadas ao arrefecimento passivo, apenas algumas estão testadas e serão consideradas para o clima da região, sendo quente e secos.

Como referido no Capítulo 2.1.2, para os climas quentes e secos existem diversas estratégias de arrefecimento passivo resultando numa redução do consumo de energia com sistemas ativos sendo, a proteção solar, modulação do calor e rejeição de calor.

Assim, este fator, terá de ser verificado quanto ao dimensionamento da central térmica (*Cooling Design*) e nos consumos de energia durante um período de 4 392 horas, de 1 de abril a 30 de setembro (*Simulation*).

As medidas que serão utilizadas para a verificação do desempenho energético do edifício, estão de acordo com as apresentadas Tabela 4.17.

Tabela 4.17 - Técnicas de arrefecimento passivo utilizadas na simulação.

Proteções solares fixas nos vãos envidraçados		
Palas horizontais	0.5 m	
	1 m	
	1.5 m	
	2 m	
	L/H (0.15 / 0.15) m	
	2L/H (0.3 / 0.15) m	
	3L/H (0.45 / 0.15) m	
Palas horizontais + Palas verticais	1 m	

Proteções solares móveis nos vãos envidraçados		
Pano altamente refletivo	Pelo exterior	Com controlo solar de 100W/m ² normal ao vão
Pano altamente refletivo	Pelo interior	Com controlo solar de 100W/m ² normal ao vão
Redução da absorção solar da envolvente		
Aplicação cor clara	Cobertura e Paredes Exteriores	Alteração do coeficiente de absorção solar de 0.6 para 0.4
Ventilação natural		
Ventilação natural	Simulação	Uso do regime <i>Calculated</i> , em detrimento do <i>Scheduled</i> .

A ventilação natural foi simulada no regime *Calculated* em detrimento do sistema *Scheduled* visto que no primeiro, o *software* entra com todos os elementos necessários ao seu cálculo como pressão atmosférica, direção e velocidade do vento e as infiltrações. (*EnergyPlus.net*)

4.9. Sistemas de arrefecimento ativos

Neste ponto demonstram-se os sistemas de arrefecimento ativo, utilizados para que se possa avaliar através de simulação energética a que oferece uma maior eficiência. Em paralelo, verificar-se-ão outros 2 fatores, sendo o tempo que a temperatura de *setpoint* não foi atingida e as horas de desconforto térmico dos ocupantes. Estes 2 valores serão apresentados num formato de horas sobre o período de simulação.

No caso de os sistemas serem compostos por mais de um tipo de equipamento, Ar-Água e Ar-DX, o software necessita de saber quais são as prioridades de funcionamento. Assim, definiu-se o sistema de ventilação das UTAN como prioridade 1, e as unidades interiores, ventilo convetores, no caso de *Chiller*, e/ou unidades interiores de VRF (expansão direta), como prioridade 2.

Quanto aos sistemas de climatização, serão abordados 5, sendo que cada um com as suas características específicas, definirão o mais eficiente no consumo de energia final.

Os sistemas a serem simulados são os seguintes:

Sistema 1 – Sistema Ar-Água a *Chiller*, arrefecido a ar,

Sistema 2 – Sistema Ar-Água a *Chiller*, arrefecido a água com permutador de calor geotérmico,

Sistema 3 - Sistema de distribuição de ar DX (expansão direta) com equipamento interior e exterior VRF com bomba de calor, arrefecido a ar,

Sistema 4 - Sistema de distribuição de ar DX (expansão direta) com equipamento interior e exterior VRF com bomba de calor, arrefecido a água com permutador de calor geotérmico,

Sistema 5 - Sistema de distribuição de ar com arrefecimento evaporativo indireto, equipamentos interiores VRF conectados a unidade exterior VRF com bomba de calor, arrefecido a água com permutador de calor geotérmico.

Sistema 1 – Sistema Ar-Água a *Chiller*, arrefecido a ar

A Figura 4.11 apresenta o Sistema 1, composto por duas UTAN (Unidades de tratamento de Ar Novo), com sistema VAV (*Variable Air Volume*) e com uma bateria de arrefecimento, conectados a uma máquina térmica exterior *Chiller* arrefecido a ar.

Como equipamentos interiores, foram utilizados FCU (*Fan Coil Units*) ou VC (Ventilo convetores), com bateria de arrefecimento a água e bateria de aquecimento elétrico.

Na Tabela 4.18, apresentam-se os dados técnicos referentes ao Sistema 1.

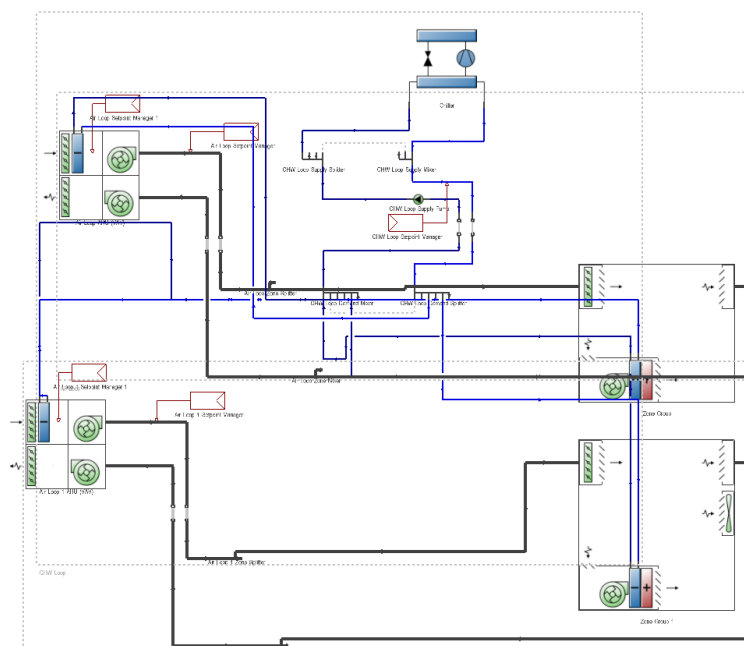


Figura 4.11 - Sistema ar-água com *Chiller*, arrefecido a ar.

Tabela 4.18 - Dados técnicos Sistema 1.

Dimensionamento da potência térmica <i>Cooling Design</i> (kW)	166
Equipamento Exterior	<i>ElectricEIRChiller Scroll McQuay AGZ060D</i>
Potência térmica de arrefecimento do equipamento (kW)	197.3
EER	2.87

Sistema 2: Sistema Ar-Água a *Chiller*, arrefecido a água com permutador de calor geotérmico

A Figura 4.12 apresenta o Sistema 2, composto por duas UTAN (Unidades de tratamento de Ar Novo), com sistema VAV (*Variable Air Volume*) e com uma bateria de arrefecimento, conectados a uma máquina térmica exterior *Chiller* com arrefecimento a água, com permutador de calor geotérmico.

Como equipamentos interiores, foram utilizados FCU (*Fan Coil Units*) ou VC (Ventilo convetores), com bateria de arrefecimento a água e bateria de aquecimento elétrico.

Na Tabela 4.19, apresentam-se os dados técnicos referentes ao Sistema 2.

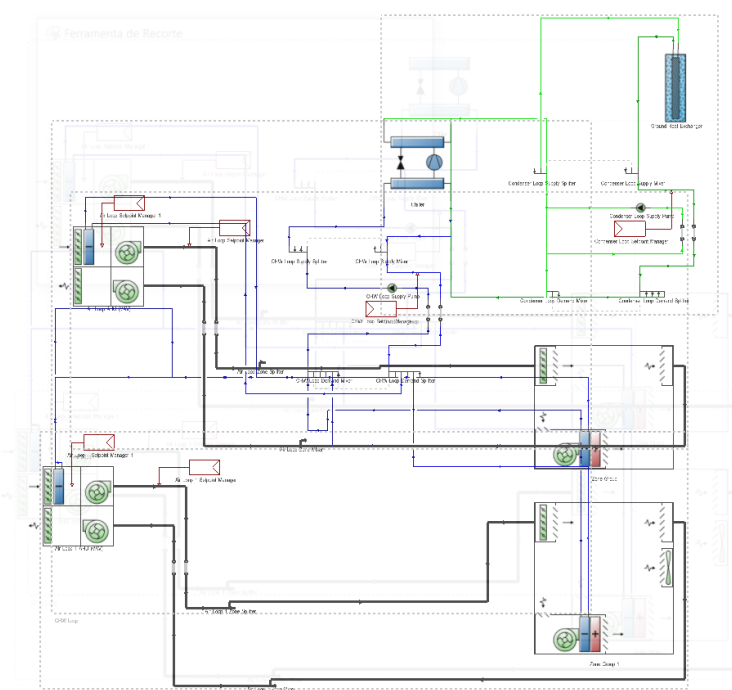


Figura 4.12 - Sistema ar-água com Chiller, arrefecido a água com permutador de calor geotérmico

Tabela 4.19 - Dados técnicos Sistema 2.

Dimensionamento da potência térmica <i>Cooling Design</i> (kW)	166
Equipamento Exterior	<i>ReformEIRChiller Scroll Trane CGWD</i>
Potência térmica de arrefecimento do equipamento (kW)	207
EER	3.99
Sistema geotérmico	Vertical
Número de furos	120
Profundidade (m)	76
Caudal volúmico (m³/s)	0.01122
Condutividade térmica do solo (W/m.K)	2.6
Temperatura do solo (°C)	26

Os dados geotérmicos utilizados no Sistema 2 para fins de simulação energética apresentam-se no quadro em baixo, na Figura 4.13.

Edit Ground heat exchanger -

Ground heat exchanger

General | G-function Data

Name: Ground Heat Exchanger

Ground Heat Exchanger Template: Ground Heat Exchanger Template

Template: Vertical U-tube 76m 24-boreholes

Ground Heat Exchanger Type: Vertical

Type: 1-Vertical

Ground Properties

Ground thermal conductivity (W/m-K): 2.600000

Ground thermal heat capacity (J/m³-K): 2347000.00

Ground temperature (°C): 26.000

Flow rate

Design flow rate (m³/s): 0.01122

Borehole and Pipe Geometry

Number of boreholes: 120

Depth of top of borehole (m): 1.0

Borehole length (m): 76.0

Borehole diameter (m): 0.127000

Pipe outer diameter (m): 0.0266667

Pipe thickness (m): 0.00241285

U-tube distance (m): 0.0253977

Grout and Pipe Properties

Grout thermal conductivity (W/m-K): 0.692626

Grout thermal heat capacity (J/m³-K): 3900000.00

Pipe thermal conductivity (W/m-K): 0.391312

Pipe thermal heat capacity (J/m³-K): 1770000.00

Others

G-function reference ratio: 0.000500

Help

Ground Heat Exchanger - Vertical (Borehole)

Quick/Simple sizing

DesignBuilder provides a quick/simple way to size ground heat exchangers. The procedure is to use DesignBuilder Heating and Cooling Design calculations to obtain peak heating loads in kW, then use the table below to get a minimum number for the model.

Peak heating load (kW)	Peak cooling load (kW)							
	10	20	30	40	50	60	70	80
10	4	4	8	8	8	12	12	12
20	8	8	8	12	12	12	12	12
30	12	12	12	12	16	16	16	16
40	16	16	16	16	16	24	24	24
50	24	24	24	24	24	24	24	24
60	24	24	24	24	24	24	24	24
70	40	40	40	40	40	40	40	40
80	40	40	40	40	40	40	40	40
90	40	40	40	40	40	40	40	40
100	40	40	40	40	40	40	40	40

The Maximum flow rate for the ground heat exchanger normally be entered as the sum of the rated flow rate of connected heat pumps including those for heating and cooling.

Detailed/Precise sizing

The net heating or cooling of the ground over each season on the accumulated heat rejection/extraction, and the building loads throughout the whole year (not only the mentioned above). This data can be obtained through based on simple HVAC settings in DesignBuilder.

Figura 4.13 - Dados geotérmicos (permutador de calor).

No quadro apresentado na Figura 4.13, foi possível alterar algumas variáveis relativamente ao solo, dependendo da sua localização. Assim, alteraram-se alguns parâmetros, que estavam por defeito no programa de simulação energética, nomeadamente a condutividade térmica do solo, a temperatura do solo e o caudal de água para arrefecimento. Este último parâmetro é alterado em função das necessidades do(s) equipamento(s) ao qual está conectado.

Importa referir que os dados referentes à condutividade térmica do solo e de temperatura do solo foram extraídos de literatura pesquisada [28].

Sistema 3 – Sistema de distribuição de ar DX (expansão direta) com equipamento VRF, arrefecido a ar

A Figura 4.14 apresenta o Sistema 3, composto por duas UTAN (Unidades de tratamento de Ar Novo), com sistema VAV (*Variable Air Volume*) e com uma bateria de arrefecimento DX, conectados a uma máquina térmica exterior VRF (*Variable Refrigerant Fluid*) com bomba de calor e arrefecido a ar.

Como equipamentos interiores, foram utilizados VC (Ventilo convetores), com bateria de arrefecimento e/ou de aquecimento de expansão direta.

Na Tabela 4.20, apresentam-se os dados técnicos referentes ao Sistema 3.

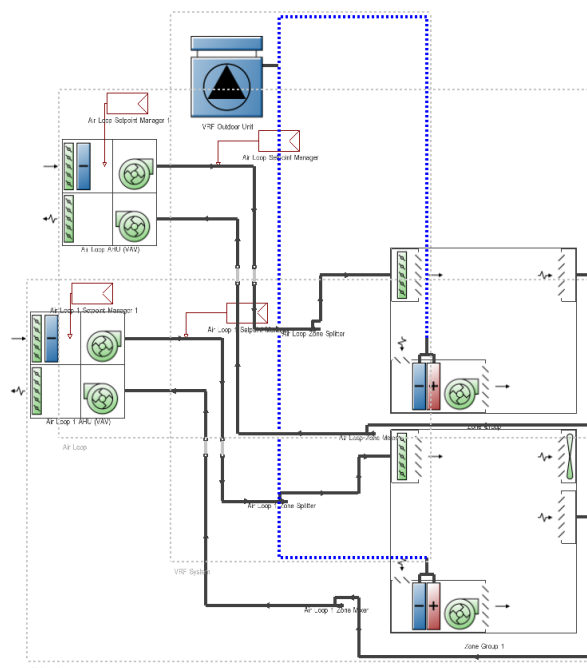


Figura 4.14 - Sistema de distribuição de ar DX (Expansão direta), com equipamento VRF arrefecido a ar.

Tabela 4.20 - Dados técnicos Sistema 3.

Dimensionamento da potência térmica <i>Cooling Design</i> (kW)	166
Equipamento Exterior	EnergyPlus Example (VRF)
Potência térmica de arrefecimento do equipamento (kW)	Autodimensionado
EER	3.3

Neste sistema foi utilizado uma unidade exterior de VRF em modo *Autosize*, sendo que na impossibilidade de poder fazer conexões de uma unidade exterior às unidades de expansão direta nas UTAN, decidiu-se desta forma, porque não seria prudente utilizar a totalidade da potência de arrefecimento de projeto para a unidade exterior.

O EER utilizado tanto na unidade exterior e baterias de expansão direta das UTAN pelas mesmas razões do paragrafo anterior, tendo-se adotado o EER por defeito do *EnergyPlus*.

Sistema 4 - Sistema de distribuição de ar DX (expansão direta) com equipamento VRF, arrefecido a água com permutador de calor geotérmico.

A Figura 4.15 apresenta o Sistema 4, composto por duas UTAN (Unidades de tratamento de Ar Novo), com sistema VAV (*Variable Air Volume*) e com uma bateria de arrefecimento DX, conectados a uma máquina térmica exterior VRF (*Variable Refrigerant Fluid*) com bomba de calor arrefecido a água com permutador de calor geotérmico.

Para este sistema foi utilizado uma unidade exterior de VRF em modo *Autosize*, sendo que na impossibilidade de poder fazer conexões às unidades de expansão direta nas UTAN, decidiu-se desta forma, porque não seria prudente utilizar a totalidade da potência de arrefecimento de projeto para a unidade exterior.

O EER utilizado tanto na unidade exterior e baterias de arrefecimento das UTAN são de acordo com o utilizado no *Chiller*, não havendo possibilidade de utilizar os *templates* disponíveis no software de simulação.

Como equipamentos interiores, foram utilizados VC (Ventilo convetores), com bateria de expansão direta.

A Tabela 4.21 apresenta dados técnicos referentes ao Sistema 4.

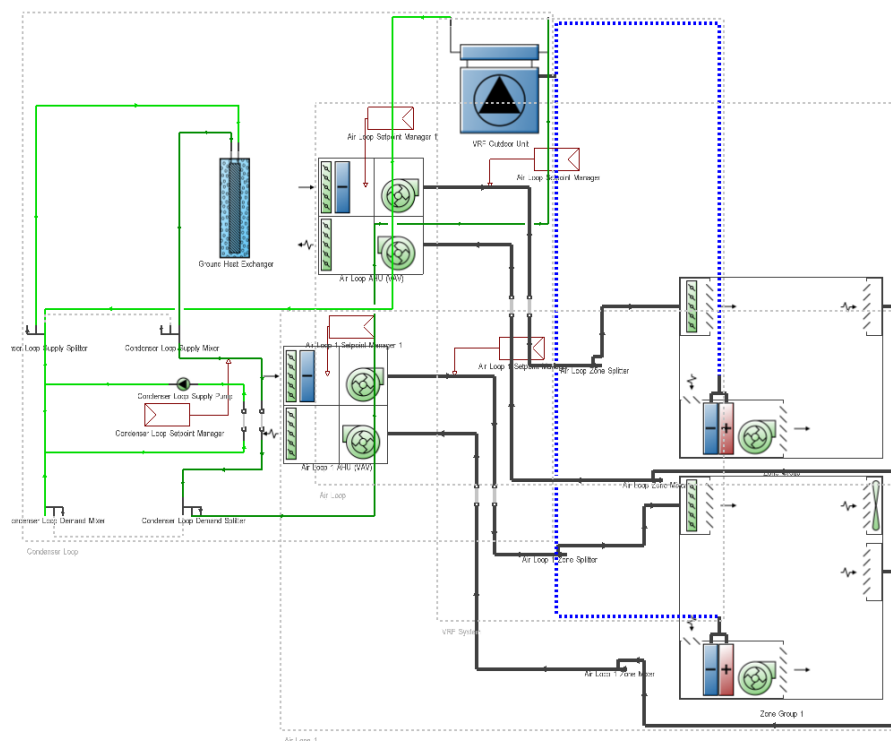


Figura 4.15 - Sistema de distribuição de ar DX (Expansão direta), com equipamento VRF arrefecido a água com permutador de calor geotérmico.

Tabela 4.21 - Dados técnicos Sistema 4.

Dimensionamento da potência térmica <i>Cooling Design</i> (kW)	166
Equipamento Exterior	<i>EnergyPlus Example</i>
Potência térmica de arrefecimento do equipamento (kW)	Autodimensionado
EER	3.99
Sistema geotérmico	Vertical
Número de furos	120
Profundidade (m)	76
Caudal volúmico (m ³ /s)	0.00959
Condutividade térmica do solo (W/m.K)	2.6
Temperatura do solo (° C)	26

Os valores referentes aos dados geotérmicos utilizados no Sistema 4, para fins de simulação energética, apresentam-se na Figura 4.16.

Edit Ground heat exchanger -

Ground heat exchanger

General G Function Data

General

Name Ground Heat Exchanger

Ground Heat Exchanger Template

Template Vertical U-tube 76m 120-boreholes

Ground Heat Exchanger Type

Type 1-Vertical

Ground Properties

Ground thermal conductivity (W/m-K) 2.600000

Ground thermal heat capacity (J/m³-K) 2347000.00

Ground temperature (°C) 26.000

Flow rate

Design flow rate (m³/s) 0.00959

Borehole and Pipe Geometry

Number of boreholes 120

Depth of top of borehole (m) 1.0

Borehole length (m) 76.0

Borehole diameter (m) 0.127016

Pipe outer diameter (m) 0.0266667

Pipe thickness (m) 0.00241285

U-tube distance (m) 0.0253977

Grout and Pipe Properties

Grout thermal conductivity (W/m-K) 0.692626

Grout thermal heat capacity (J/m³-K) 3900000.00

Pipe thermal conductivity (W/m-K) 0.391312

Pipe thermal heat capacity (J/m³-K) 1770000.00

Others

G-function reference ratio 0.000836

Help

Info Data

Ground Heat Exchanger - Vertical (Borehole)

Quick/Simple sizing

DesignBuilder provides a quick/simple way to size ground heat exchangers. The procedure is to use DesignBuilder Heating and Cooling Design calculations to obtain peak heating loads in kW, then use the table below to get a minimum number for the model.

	Peak cooling load (kW)								
	10	20	30	40	50	60	70	80	
Peak heating load (kW)	10	4	4	8	8	8	12	12	12
20	8	8	8	12	12	12	12	12	
30	12	12	12	12	16	16	16	16	
40	16	16	16	16	16	24	24	24	
50	24	24	24	24	24	24	24	24	
60	24	24	24	24	24	24	24	24	
70	40	40	40	40	40	40	40	40	
80	40	40	40	40	40	40	40	40	
90	40	40	40	40	40	40	40	40	
100	40	40	40	40	40	40	40	40	

The Maximum flow rate for the ground heat exchanger normally be entered as the sum of the rated flow rate of the connected heat pumps including those for heating and cooling.

Detailed/Precise sizing

The net heating or cooling of the ground over each season on the accumulated heat rejection/extraction, and the building loads throughout the whole year (not only the mentioned above). This data can be obtained through based on simple HVAC settings in DesignBuilder.

Model data <admin> Import Help Cancel OK

Figura 4.16 - Dados geotérmicos Sistema 4 (permutador de calor).

Para este sistema, assumiram-se os dados geotérmicos atribuídos ao Sistema 2, à exceção do caudal volúmico da água de arrefecimento do condensador, passando de 0,01122 m³/s para 0,00959 m³/s.

Sistema 5 - Sistema de distribuição de ar com arrefecimento evaporativo indireto, equipamentos interiores VRF conectados a unidade exterior VRF com bomba de calor, arrefecido a água com permutador de calor geotérmico.

A Figura 4.17, apresenta o Sistema 5 composto por duas UTAN (Unidades de tratamento de Ar Novo), com sistema de arrefecimento evaporativo indireto, e equipamentos interiores de VRF conectados a uma máquina térmica exterior VRF (*Variable Refrigerant Fluid*) com bomba de calor arrefecido a água com permutador de calor geotérmico.

Para este sistema foi utilizado uma unidade exterior de VRF em modo *Autosize*, sendo que na impossibilidade de poder fazer conexões às unidades de expansão direta nas UTAN, decidiu-se desta forma, porque não seria prudente utilizar a totalidade da potência de arrefecimento de projeto para a unidade exterior, não estando esta conectada às baterias de expansão direta para arrefecimento das UTAN.

Os dados relativos ao sistema de arrefecimento evaporativo indireto utilizado no Sistema 5, para fins de simulação energética, apresentam-se na Figura 4.18.

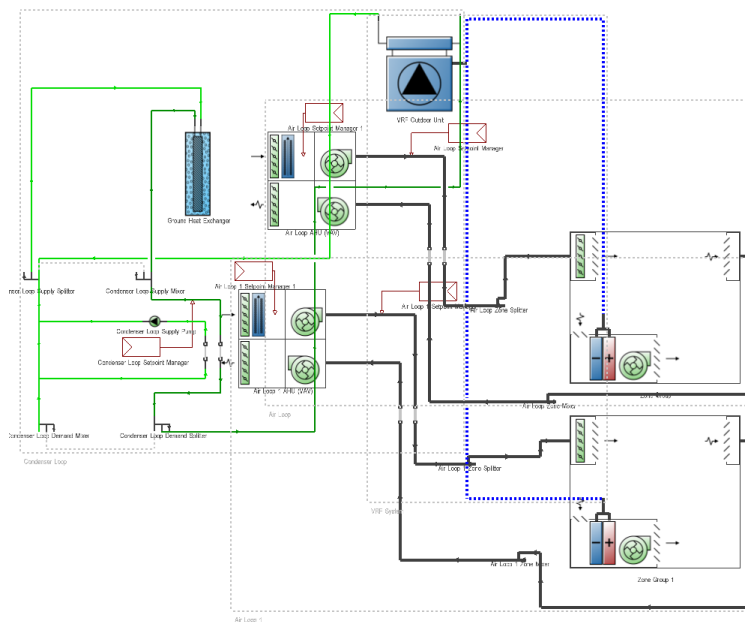


Figura 4.17 - Sistema de distribuição de ar arrefecimento evaporativo indireto, com unidades interiores e exterior VRF, arrefecido a água com permutador de calor geotérmico.

Edit Evaporative Cooler -

Evaporative Cooler

General

General

NameAir Loop 1 AHU Outdoor air system Evap

Type3-Indirect CelDekPad

Settings

Direct pad area (m2)0.600

Direct pad depth (m)0.200

Indirect heat exchanger effectiveness0.700

Re-circulating water pump power consumption (W)200,00

Secondary Fan

Secondary fan flow rate (m3/s)1,000

Secondary fan total efficiency0.700

Secondary fan delta pressure (Pa)200,000

Operation

Availability scheduleOn 24/7

Figura 4.18 - Dados do bloco de arrefecimento evaporativo indireto.

O EER utilizado tanto na unidade exterior e baterias de arrefecimento das UTAN, são de acordo com o utilizado no Chiller, não havendo possibilidade de utilizar os templates disponíveis no software de simulação.

Como equipamentos interiores, foram utilizados VC (Ventilo convetores), com bateria de expansão direta.

A seguir, na Tabela 4.22, apresentam-se os dados técnicos referentes ao Sistema 5.

Tabela 4.22 - Dados técnicos Sistema 5.

Dimensionamento da potência térmica <i>Cooling Design</i> (kW)	166
Equipamento Exterior	<i>EnergyPlus</i> Example
Potência térmica de arrefecimento do equipamento (kW)	Autodimensionado
EER	3.99
Área do bloco (m ²)	0.6
Profundidade do bloco (m)	0.2
Sistema geotérmico	Vertical
Número de furos	120
Profundidade (m)	76
Caudal volúmico (m ³ /s)	0.00959
Condutividade térmica do solo (W/m.K)	2.6
Temperatura do solo (°C)	26

Em baixo, na Tabela 4.23, apresenta-se um quadro resumo das características dos sistemas a utilizar para a realização deste trabalho.

Importa referir que para os primeiros 5 sistemas serão utilizados de acordo com os requisitos da norma SBC, e o último será utilizado com os requisitos da norma ASHRAE 90.1, no Capítulo 5.5.

Tabela 4.23 - Quadro resumo dos sistemas a utilizar nas simulações para este projeto.

Sistema	Sistema 1	Sistema 2	Sistema 3	Sistema 4	Sistema 5	ASHRAE + Sistema 5
Denominação	AHU + CHILLER & VC AIR	AHU + CHILLER & VC GEO	AHU DX+ VRF AIR	AHU DX+ VRF GEO	AHU EvapCool + VRF GEO	ASHRAE AHU Evap+VRF GEO
Tipo	Air cooled	Geo water cooled	Air cooled	Geo water cooled	Geo water cooled	Geo water cooled
Equipamentos Sistema	Ar agua chiller	Ar agua chiller	VRF	VRF	Arref. Evap. + VRF	Arref. Evap. + VRF
COP	2,9	3,99	3,3	3,99	3,99	3,99
Equipamento usado na simulação	ElectricEIRChiller Scroll McQuay AGZ060D 197,3kW/COP 2,87	ReformEIRChiller Scroll Trane CGWD 207kW/3.99COP/None	Energy Plus Example	Energy Plus Example	Energy Plus Example	Energy Plus Example

Capítulo 5

Apresentação de resultados

5.1. Solução construtiva

Apresentadas as diversas soluções construtivas procedeu-se à simulação para verificar qual a mais eficiente. Em cada solução procedeu-se ao *Cooling Design*, determinando a potência máxima de projeto para arrefecimento para o edifício, Hotel.

A simulação em *Cooling Design*, determina as cargas térmicas com base no ficheiro epw e nas configurações dadas pelo utilizador, e consequentemente as necessidades de arrefecimento total, *Total Cooling*, para um dado dia como sendo o mais desfavorável.

Para determinar o dia mais desfavorável, simulou-se o modelo do edifício durante o período de 1 de abril a 30 de setembro, verificando-se onde as necessidades de arrefecimento eram maiores, como mostra na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 - Dia com maior carga térmica no interior do edifício (15/06 - 14:00)

resort, hotel						
Analysis	Summary	Parametric	Optimisation + UA/SA	Data Visualisation		
Date/Time	Solar Gains Exterior Windows (kW)	Zone Sensible Heating (kW)	Zone Sensible Cooling (kW)	Sensible Cooling (kW)	Total Cooling (kW) /	Zone t
15/06/2002 14:00	4,987576	0	-47,3608	-169,1685	-219,4385	0,374E
15/06/2002 13:00	3,195757	0	-46,63911	-161,9508	-214,6224	0,374E
15/06/2002 15:00	6,423977	0	-44,12708	-173,7881	-206,1741	0,374E

Como se verifica na tabela acima, o período mais desfavorável, encontra-se no dia 15/06 pelas 14:00.

Os dados a serem utilizados na simulação em *Cooling Design*, são como os demonstrados na Figura 5.1.

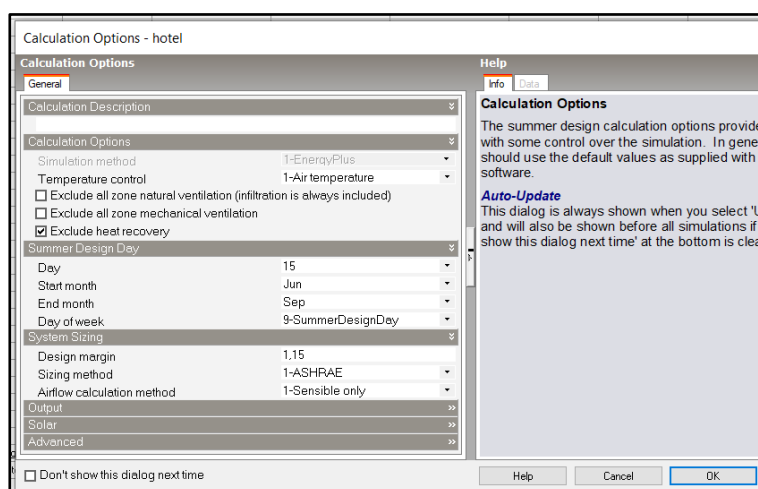


Figura 5.1 - Introdução de dados em *Cooling Design*.

No seguimento das simulações realizadas para cada solução construtiva, os resultados para as potências de projeto para arrefecimento, são os demonstrados na Tabela 5.2:

Tabela 5.2 - Potências de projeto para arrefecimento (soluções construtivas em teste).

Cooling Design – Dimensionamento de potências de projeto para arrefecimento			
Solução construtiva	Potência arrefecimento - sem Ar Novo (kW)	Potência arrefecimento - com Ar Novo (kW)	Variação da potência (%)
Solução 1	94.9	197.9	0 %
Solução 2	95.2	197.3	- 0.3 %
Solução 3	88.7	184.7	- 7 %
Solução 4	69.0	165.6	-16 %

Com a utilização de uma solução com uma inércia térmica forte, como técnica de arrefecimento passivo, reduziu-se em 16% a potência de projeto para arrefecimento.

A introdução de Ar Novo é responsável por mais de 50% da potência para arrefecimento.

O gráfico apresentado em baixo na Figura 5.2, apresenta o impacto das potências de projeto de arrefecimento, com introdução de Ar Novo, para as diversas soluções construtivas.

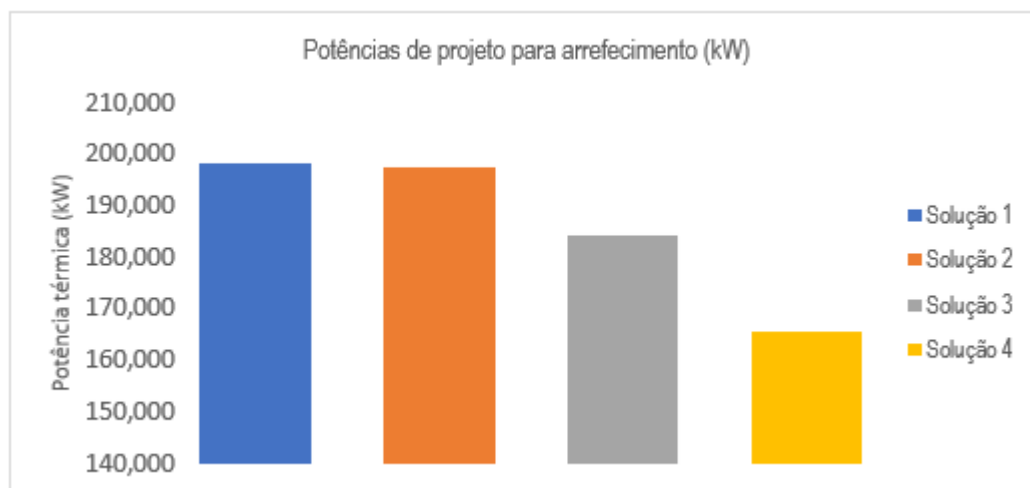


Figura 5.2 - Potências de projeto para arrefecimento por solução construtiva.

Todos os dimensionamentos acima apresentados foram feitos em iguais condições para todas as soluções construtivas, i.e., com o mesmo sistema de climatização e para no mesmo dia mais desfavorável.

O sistema de climatização usado para as simulações, foi o Sistema 4, composto por um sistema de distribuição de ar, UTAN, de expansão direta (DX) com equipamentos VRF (exterior e interior), arrefecido a água, com permutador de calor geotérmico.

No seguimento das simulações de consumos energéticos, apresentam-se os resultados obtidos, na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 - Resultado dos consumos de energia final das soluções construtivas.

Solução construtiva	Sistema de climatização	Potência de arrefecimento (kW)	Consumo anual de energia elétrica (kWh/m ² .ano)	Consumo anual de energia elétrica (kWh.ano)	Variação do consumo (%)
Solução 1	UTAN DX + VRF + GeoCondenser	197.9	82.9	379 960	0.00%
Solução 2		197.3	82.9	379 941	- 0.01%
Solução 3		184.7	82.8	355 778	- 6.36%
Solução 4		165.6	79.3	341 132	- 10.22%

Constatou-se que os desvios, nas diferenças do dimensionamento de potências térmicas para as várias soluções construtivas, não representam na mesma percentagem os desvios dos seus consumos de energia final. Ainda assim, com a Solução 4, conseguiu-se uma redução de consumo de energia final na ordem dos 10%.

No quadro seguinte, Tabela 5.4, apresentam-se os resultados das emissões de GEE das soluções construtivas.

Tabela 5.4 - Emissão de Gases com Efeito de Estufa das soluções construtivas.

Solução Construtiva	Consumo de energia final (kWh)	Fator de conversão energia final para energia primária (kWhEP.kWh)	Consumo energia primária (kWhEP)	Tipo de energia final	Fator de conversão energia primária para emissões de CO ₂ (kgCO ₂ /kWhEP)	Produção de GEE (kgCO _{2e})
Solução 1	379 960	2.5	949 900	Elettricidade	0.144	136 786
Solução 2	379 941	2.5	949 853	Elettricidade	0.144	136 779
Solução 3	355 778	2.5	889 445	Elettricidade	0.144	128 080
Solução 4	341 132	2.5	852 830	Elettricidade	0.144	122 808

Assumindo que o fator de conversão de energia final para energia primária seja de 2.5 kWhEP.kWh, o desvio de energia primária representa um valor de 97.07 MWhEP.

Assim, em termos de emissões de GEE e assumindo a conversão de acordo com o Despacho n.º 6476-H/2021, de 1 de julho, evita-se a emissão de 13.98 tCO_{2e}.

A escolha da solução construtiva com um melhor desempenho térmico incidiu na Solução 4, sendo esta a ser adotada para o resto do estudo.

5.2. Impacto das medidas de arrefecimento passivo nas potências de projeto

Após a escolha da melhor solução construtiva, foram simuladas algumas das técnicas de arrefecimento passivo de acordo com o Capítulo 2.1.1.

Assim, de acordo com o simulado, e, com as técnicas descritas no capítulo 4.8, apresenta-se na Tabela 5.5 um resumo dos valores obtidos nas simulações sobre as necessidades de projeto para arrefecimento.

Tabela 5.5 - Potência de projeto de arrefecimento recorrendo a técnicas de arrefecimento passivo de forma isolada

Técnica de arrefecimento passivo	Potência térmica (kW)
Absorção solar as 0,4 (cobertura e paredes externas)	159.9
Palas horizontais e verticais c/ 1m de projeção	163.0
Persianas com alta refletividade pelo exterior, com controlo solar 100W/m ²	163.5
Palas horizontais 2m	163.5
Palas horizontais 1.5m	163.6
Palas horizontais 1m	163.7
Louvres 3L/H	163.7
Louvres 2L/H	163.8
Louvres L/H	163.9
Palas horizontais 0.5m	164.2
Ventilação natural	165.6
Solução base	165.6
Persianas com alta refletividade pelo interior, com controlo solar 100W/m ²	166.0

O gráfico apresentado na Figura 5.3, mostra o impacto das diversas técnicas de arrefecimento passivo utilizadas na simulação energética, para as necessidades de arrefecimento, com base nos dados da tabela anterior.

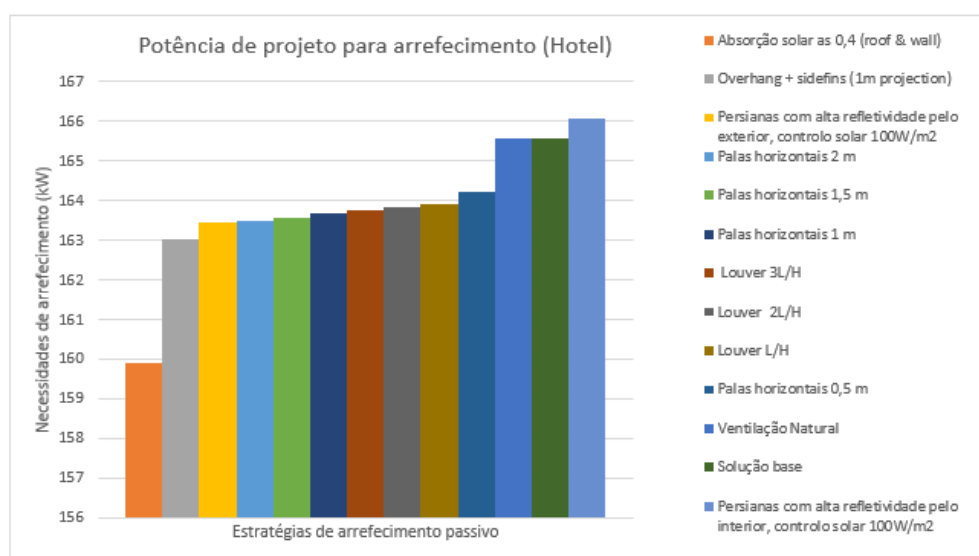


Figura 5.3 - Potência de projeto para arrefecimento de acordo com as técnicas de arrefecimento passivo de forma isolada.

Verificaram-se os impactos das técnicas de arrefecimento passivo nas potências de projeto para arrefecimento, com especial ênfase na adoção da medida de alteração da absorção solar, de 0.6 para 0.4, garantindo uma redução de 3.4% no dimensionamento de projeto para arrefecimento.

A técnica de arrefecimento passivo, ventilação natural, tem um valor igual à solução base, não sofrendo qualquer impacto nesta simulação, *Cooling Design*. A razão para este facto é que um dos pressupostos nas simulações de *Cooling Design* no *EnergyPlus*, não existe vento, daí os resultados manterem-se inalterados.

Constatou-se também, nas simulações de dimensionamento, que a técnica de persianas com alta refletividade pelo interior, tem um impacto negativo relativamente à solução base.

Assim, de forma isolada, destacam-se as seguintes técnicas com melhor desempenho:

- Absorção solar 0.4;
- Palas horizontais e verticais com 1 metro de projeção;
- Persianas de alta refletividade pelo exterior, com controlo solar de 100W/m² normal ao vão.

Os melhores resultados obtidos, de forma isolada, são independentes e poderão ser integradas numa única solução, com potencial de redução das necessidades para arrefecimento.

Assim, em cada iteração adicionaram-se elementos passíveis de integração, sendo:

- Ventilação natural + Redução da absorção solar de 0.6 para 0.4 + Persianas exteriores de alta refletividade, com controlo solar de 100W/m² + Proteção solar e horizontal e vertical com projeção de 1 metro,
- Ventilação natural + Redução da absorção solar de 0.6 para 0.4 + Persianas exteriores altamente refletivas com controlo solar de 100W/m²;
- Ventilação natural + Redução da absorção solar de 0.6 para 0.4.

Após simulação das técnicas de arrefecimento passivo, de forma combinada, os resultados obtidos para o dimensionamento de potência de projeto de arrefecimento, mostram-se na Tabela 5.6.

Tabela 5.6 - Potência de projeto de arrefecimento recorrendo a técnicas de arrefecimento passivo de forma combinada.

Medida de arrefecimento passivo	Potência térmica (kW)
Ventilação Natural + AS0,4 + Persiana pelo exterior + Pala horizontal + verticais	158,9
Ventilação Natural + AS0,4 + Persiana pelo exterior	158,9
Ventilação Natural + AS0,4	159,9

Somando a este valor o resultado da melhor solução construtiva, com uma inércia térmica forte, tem-se uma redução global de potência de projeto para arrefecimento em 20%.

O gráfico representado na Figura 5.4, mostra o impacto de todas as técnicas de arrefecimento passivo, de forma isolada e combinada, utilizadas na simulação energética para dimensionamento de potência de projeto de arrefecimento.

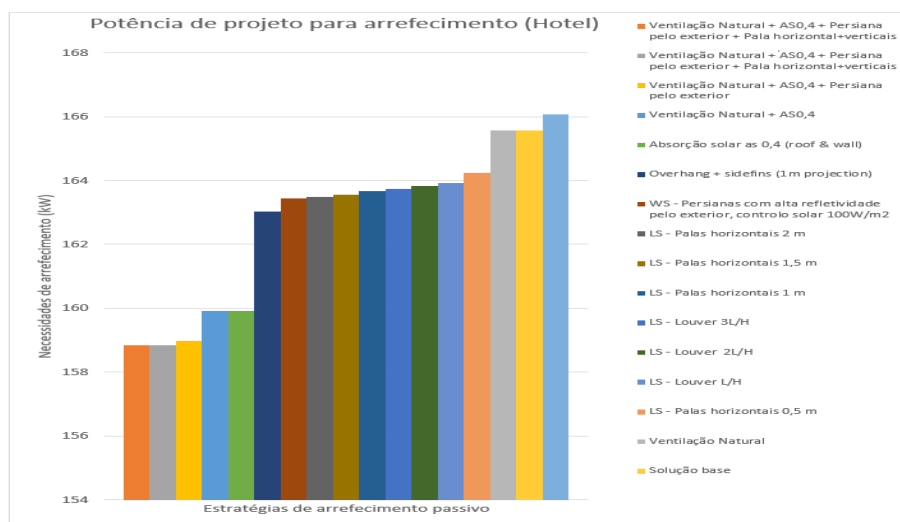


Figura 5.4 - Potência de projeto de arrefecimento com técnicas de arrefecimento passivo de forma isolada e combinada (Hotel).

5.3. Impacto das medidas de arrefecimento passivo nos consumos de energia

Para validação dos consumos energéticos das técnicas de arrefecimento passivo, simularam-se todas as técnicas no separador *Simulation*, durante o período de 1 de abril a 30 de setembro.

A Tabela 5.7, apresenta os resultados do impacto das simulações das técnicas de sistemas de arrefecimento passivo, de forma isolada e combinada, nos consumos de energia final.

Tabela 5.7 - Impacto das medidas de arrefecimento passivo nos consumos energéticos.

Medida de arrefecimento passivo	Consumos do edifício (kWh.ano)	Consumos do edifício (kWh/m².ano)
Ventilação Natural + AS0,4 + Persiana pelo exterior + Pala horizontal + verticais	325 731,00	75,76
Ventilação Natural + AS0,4 + Persiana pelo exterior com controlo solar 100W/m²	325 733,00	75,76
Ventilação Natural + AS0,4	326 320,00	75,90
Ventilação Natural	326 433,00	75,93
Absorção solar as 0,4 (cobertura e paredes externas)	338 331,00	78,69
Palas horizontais + verticais (1m de projeção)	340 365,00	79,23
Persianas com alta refletividade pelo exterior, controlo solar 100W/m²	340 652,00	79,23
Palas horizontais 2 m	340 679,00	79,24
Palas horizontais 1,5 m	340 671,00	79,24
Louvres 3L/H	340 667,00	79,24
Louvres 2L/H	340 680,00	79,24
Palas horizontais 1 m	340 721,00	79,25
Louvres L/H	340 730,00	79,25
Palas horizontais 0,5 m	340 860,00	79,28
Solução base	341 132,00	79,34
Persianas com alta refletividade pelo interior, controlo solar 100W/m²	341 283,00	79,38

Ao verificar os resultados apresentados, constata-se que a técnica que se apresenta no topo da tabela, reduziu o consumo de energia final em torno dos 4.5%, representando um desvio de 15.4 MWh.ano de energia final, relativamente à solução base.

Somando a este valor, o resultado da melhor solução construtiva, com uma inércia térmica forte, tem-se uma redução global de consumo de energia final em aproximadamente 15%, sendo a inércia térmica um fator fundamental.

O gráfico apresentado na Figura 5.5, mostra o impacto de todas as técnicas de arrefecimento passivo utilizadas na simulação energética, de forma isolada e combinada, nos consumos de energia final do edifício.

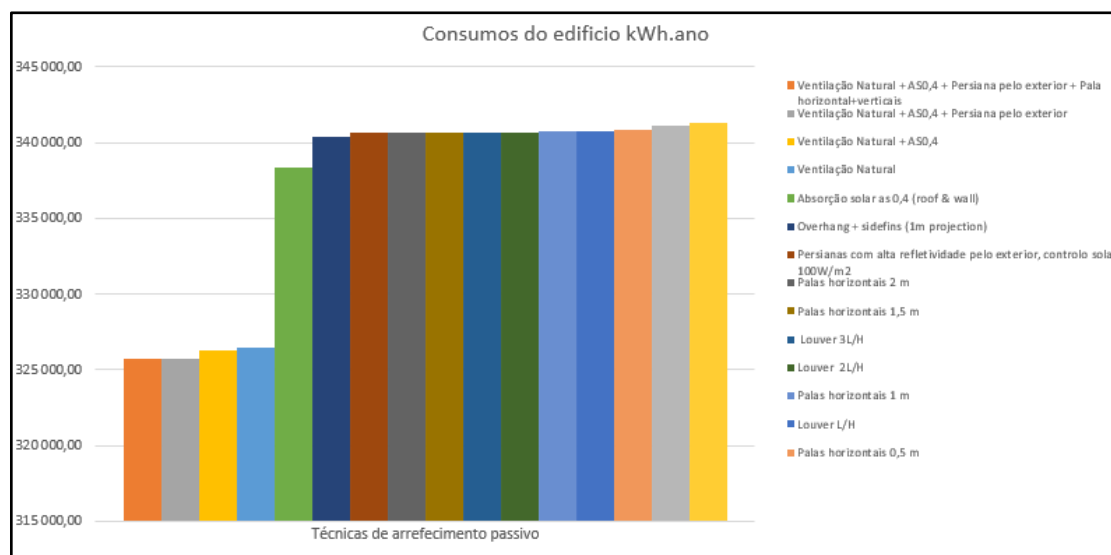


Figura 5.5 - Consumos de energia final sobre as estratégias de arrefecimento passivo.

A Tabela 5.8, apresenta o impacto das técnicas de arrefecimento passivo, de forma isolada e combinada, na emissão de GEE.

Tabela 5.8 - Emissões de Gases com Efeito de Estufa com técnicas de arrefecimento passivo.

Técnicas de arrefecimento passivo	Consumo energia final (kWh)	Fator de conversão energia final para energia primária (kWhEP.kWh)	Consumo de energia primária (kWhEP)	Tipo de energia final	Fatores de conversão de energia primária para emissões de CO2 (kgCO2/kWhEP)	Emissão de GEE (kgCO2e)
Ventilação Natural + AS0,4 + Persiana pelo exterior + Pala horizontal+verticais	325 731,00	2,5	814 327,50	Eleticidade	0,144	117 263,16
Ventilação Natural + AS0,4 + Persiana pelo exterior	325 733,00	2,5	814 332,50	Eleticidade	0,144	117 263,88
Ventilação Natural + AS0,4	326 320,00	2,5	815 800,00	Eleticidade	0,144	117 475,20
Absorção solar as 0,4 (roof & wall)	338 331,00	2,5	845 827,50	Eleticidade	0,144	121 799,16
Overhang + sidefins (1m projection)	340 365,00	2,5	850 912,50	Eleticidade	0,144	122 531,40
Persianas com alta refletividade pelo exterior, controlo solar 100W/m2	340 652,00	2,5	851 630,00	Eleticidade	0,144	122 634,72
Palas horizontais 2 m	340 679,00	2,5	851 697,50	Eleticidade	0,144	122 644,44
Palas horizontais 1,5 m	340 671,00	2,5	851 677,50	Eleticidade	0,144	122 641,56
Palas horizontais 1 m	340 721,00	2,5	851 802,50	Eleticidade	0,144	122 659,56
Louver 3L/H	340 667,00	2,5	851 667,50	Eleticidade	0,144	122 640,12
Louver 2L/H	340 680,00	2,5	851 700,00	Eleticidade	0,144	122 644,80
Louver 1L/H	340 730,00	2,5	851 825,00	Eleticidade	0,144	122 662,80
Palas horizontais 0,5 m	340 860,00	2,5	852 150,00	Eleticidade	0,144	122 709,60
Ventilação Natural	326 433,00	2,5	816 082,50	Eleticidade	0,144	117 515,88
Solução base	341 132,00	2,5	852 830,00	Eleticidade	0,144	122 807,52
Persianas com alta refletividade pelo interior, controlo solar 100W/m2	341 283,00	2,5	853 207,50	Eleticidade	0,144	122 861,88

Assumindo que o fator de conversão de energia final para energia primária seja de 2.5 kWhEP.kWh, o desvio de energia primária representa um valor de 38.50 MWhEP.

Assim, em termos de emissões de GEE e assumindo a conversão de acordo com o Despacho n.º 6476-H/2021, de 1 de julho, evita-se a emissão de 5.54 tCO₂e.

Adicionando os valores da simulação resultantes da melhor solução construtiva aos sistemas passivos de arrefecimento tem-se uma redução de 135.6 MWhEP e 19.5 tCO₂e.

5.4. Eficiência energética de sistemas climatização ativos

Como última verificação de desempenho, neste capítulo pretende-se demonstrar a eficiência dos diversos sistemas de arrefecimento ativo. Para o efeito, serão realizadas simulações com os 5 sistemas de arrefecimento ativos, demonstrados no capítulo 4.9.

Relembrando, os 5 sistemas adotados para este estudo, são os seguintes:

Sistema 1 – Sistema Ar-Água a *Chiller*, arrefecido a ar,

Sistema 2 - Sistema Ar-Água a *Chiller*, arrefecido a água com permutador de calor geotérmico,

Sistema 3 - Sistema de distribuição de ar DX (expansão direta) com equipamento interior exterior VRF com bomba de calor, arrefecido a ar,

Sistema 4 - Sistema de distribuição de ar DX (expansão direta) com equipamento interior e exterior VRF com bomba de calor, arrefecido a água com permutador de calor geotérmico,

Sistema 5 - Sistema de distribuição de ar com arrefecimento evaporativo indireto, equipamentos interiores VRF conectados a unidade exterior VRF com bomba de calor, arrefecido a água utilizando a terra como permutador de calor.

Procedendo-se à simulação de consumos energéticos para os vários sistemas com a melhor solução construtiva, Solução 4, os resultados são como os apresentados na Tabela 5.9.

Tabela 5.9 - Consumos de energia dos sistemas de climatização.

Sistemas	kWh.m2.ano	kWh.ano	Horas desconforto ASHRAE 55 (h)	Setpoint not met cooling (h)
Sistema 1	87.3	372 759	363	268
Sistema 2	81.1	347 834	347.5	505
Sistema 3	85.6	365 465	385	355
Sistema 4	79.3	341 132	339	319
Sistema 5	59.4	254 603	339	192

No seguimento dos dados apresentados no quadro anterior, verifica-se a existência de potencial de redução de energia com o Sistema 5, reduzindo o consumo em 25%, relativamente ao Sistema 4, contabilizando cerca de 86.53 MWh.ano. No entanto, para o funcionamento deste sistema durante o período de simulação de 4 392 horas serão necessários aproximadamente 400 m³ de água, apenas para o arrefecimento do edifício Hotel.

Na Figura 5.6 e Figura 5.7, apresentam-se 2 gráficos com os dados referentes aos consumos de energia final de todos os sistemas de arrefecimento ativo, utilizados na simulação energética.

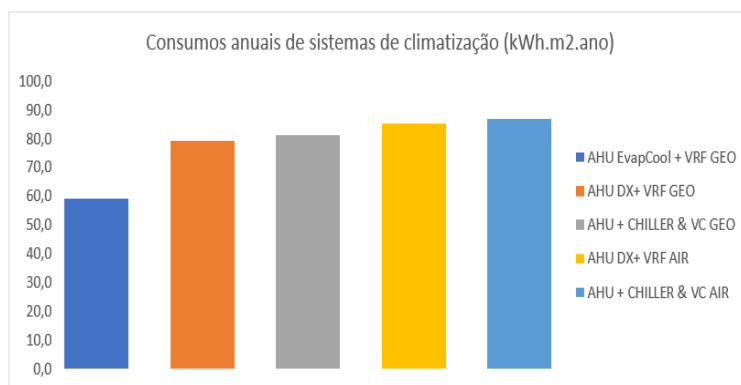


Figura 5.6 - Consumos anuais dos sistemas de climatização (kWh.m².ano).

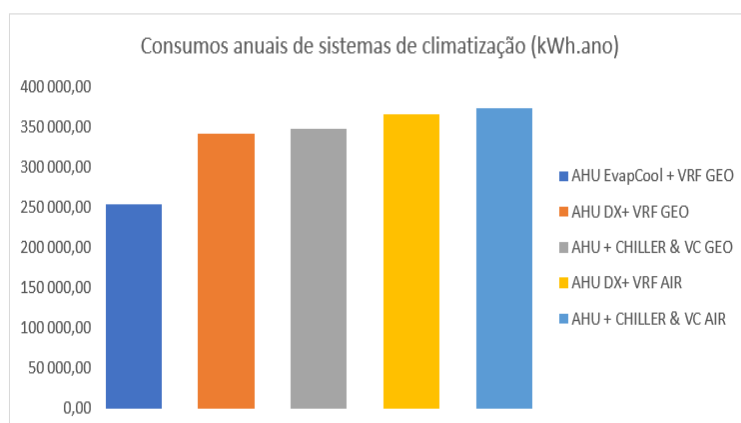


Figura 5.7 - Consumos anuais de sistemas de climatização (kWh.ano).

O quadro em baixo, Tabela 5.10, apresentam-se as emissões de GEE dos sistemas de climatização utilizados na simulação energética, com os requisitos SBC.

Tabela 5.10 - Emissões de GEE dos sistemas ativos (SBC).

Sistemas ativos (SBC)	Consumo energia final (kWh)	Fator de conversão energia final para energia primária (kWhEP.kWh)	Consumo de energia primária (kWhEP)	Tipo de energia final	Fatores de conversão de energia primária para emissões de CO2 (kgCO2/kWhEP)	Produção de GEE (kgCO2e)
Sistema 1	372 759,00	2,5	931 897,50	Elettricidade	0,144	134 193,24
Sistema 2	347 834,00	2,5	869 585,00	Elettricidade	0,144	125 220,24
Sistema 3	365 465,00	2,5	913 662,50	Elettricidade	0,144	131 567,40
Sistema 4	341 132,00	2,5	852 830,00	Elettricidade	0,144	122 807,52
Sistema 5	254 603,00	2,5	636 507,50	Elettricidade	0,144	91 657,08

Assumindo que o fator de conversão de energia final para energia primária seja de 2.5 kWhEP.kWh, o desvio de energia primária representa um valor de 216.32 MWhEP.

Assim, em termos de emissões de GEE e assumindo a conversão de acordo com o Despacho n.º 6476-H/2021, de 1 de julho, evita-se a emissão de 31.15 tCO_{2e}.

A Tabela 5.11, apresenta a desagregação de consumos de energia final dos sistemas de climatização.

Tabela 5.11 - Desagregação de consumos de energia final.

Sistemas ativos (SBC)	Consumo energia final (kWh)	Iluminação interior (kWh.ano)	Equipamentos interiores (kWh.ano)	Total fixo (kWh.ano)	Arrefecimento (kWh.ano)	Peso do arrefecimento no consumo de energia final (%)
Sistema 1	372 759,00	69 629,00	93 557,00	163 186,00	209 573,00	56%
Sistema 2	347 834,00	69 629,00	93 557,00	163 186,00	184 648,00	53%
Sistema 3	365 465,00	69 629,00	93 557,00	163 186,00	202 279,00	55%
Sistema 4	341 132,00	69 629,00	93 557,00	163 186,00	177 946,00	52%
Sistema 5	254 603,00	69 629,00	93 557,00	163 186,00	91 417,00	36%

Na desagregação de consumos de energia final, verifica-se uma variação dos valores referentes aos sistemas de climatização, incluindo bombas e ventiladores, mantendo a iluminação e os equipamentos interiores (tipo de escritório e diversos), inalterados ao longo do período. O Sistema 5 apresenta a maior eficiência energética dos sistemas de climatização, representando um peso de apenas 36% sobre o consumo total de energia no edifício Hotel.

Sendo o EER (*Efficiency Energy Ratio*) a eficiência do sistema de climatização para arrefecimento, resultando da equação 10, decidiu-se verificar numa base horária a sua evolução de acordo com as temperaturas exteriores e com o fator de carga para o dia mais desfavorável, dia 15/06, e os resultados são de acordo com os demonstrados a seguir, Figura 5.8.

$$EER = Q_{arref.} / W \quad (10)$$

Onde:

EER – Rácio de Eficiência Energética

Q_{arref.} – Potência frigorífica (W)

W – Potência elétrica (W)

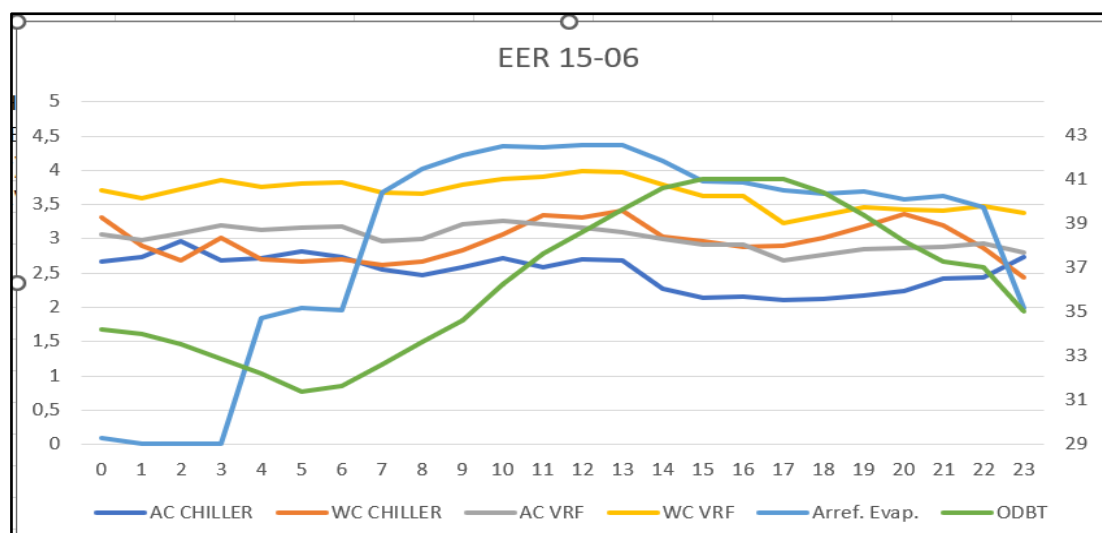


Figura 5.8 - Análise de eficiência dos sistemas para dia 15/06.

O gráfico anterior apresenta as curvas de rendimento dos sistemas de arrefecimento ativo utilizados na simulação energética do edifício Hotel, e a verde, a temperatura exterior de bolbo seco.

Constata-se que os rendimentos, ou a eficiência dos sistemas de arrefecimento dos equipamentos, apresentam uma consistência ao longo tempo, decrescendo consideravelmente durante o período em que o fator de carga e a temperatura exterior aumenta, pelas 14 horas.

Estas curvas são referentes ao dia mais desfavorável, e foram calculados com base nos dados exportados após simulação energética, que se apresentam a seguir, na Figura 5.8.

Tabela 5.12 - EER Sistemas Arrefecimento (dia 15/06, 24 horas).

EER Sistemas de arrefecimento (15-06)						
Hora	Sistema 1	Sistema 2	Sistema 3	Sistema 4	Sistema 5	ODBT
0:00	2.67	3.31	3.07	3.71	0.09	34.23
1:00	2.74	2.90	2.98	3.60	0.01	34.00
2:00	2.96	2.68	3.08	3.72	0.02	33.56
3:00	2.69	3.01	3.19	3.86	0.01	32.86
4:00	2.72	2.70	3.13	3.76	1.84	32.23
5:00	2.82	2.67	3.16	3.80	1.99	31.38
6:00	2.74	2.70	3.18	3.82	1.95	31.63
7:00	2.55	2.62	2.97	3.67	3.67	32.63
8:00	2.47	2.67	3.01	3.65	4.02	33.63
9:00	2.58	2.84	3.21	3.79	4.23	34.63
10:00	2.72	3.07	3.26	3.87	4.35	36.25
11:00	2.69	3.34	3.22	3.91	4.33	37.63
12:00	2.71	3.32	3.16	4.00	4.38	38.63
13:00	2.69	3.42	3.10	3.98	4.36	39.63
14:00	2.27	3.03	3.00	3.80	4.13	40.63
15:00	2.14	2.97	2.92	3.63	3.83	41.00
16:00	2.15	2.88	2.91	3.63	3.82	41.00
17:00	2.11	2.90	2.69	3.22	3.71	41.00
18:00	2.13	3.02	2.77	3.35	3.66	40.38
19:00	2.18	3.18	2.85	3.46	3.69	39.38
20:00	2.24	3.37	2.87	3.44	3.58	38.19
21:00	2.42	3.21	2.89	3.42	3.63	37.26
22:00	2.44	2.87	2.93	3.48	3.45	37.00
23:00	2.74	2.44	2.81	3.38	1.99	35.00
24:00	2.62	2.96	3.01	3.66	2.95	36.40

Verifica-se, nos dados apresentados da tabela em cima, que entre as 00:00 e as 04:00, no Sistema 5 o equipamento de climatização não estava em funcionamento, quando comparado com as restantes soluções.

Conclui-se, portanto, que estava a ser utilizado apenas o arrefecimento evaporativo com recurso a ventiladores e bombas de circulação de água, consumindo menos energia. Esta situação acontece num total de 843 horas de acordo com os dados da simulação, de acordo com o exemplo demonstrado na Tabela 5.13.

Tabela 5.13 - Dados arrefecimento evaporativo.

Date/Time	Total Cooling	System Fans	System Pumps	Cooling (Electricity)	Outside Dry-Bulb Temperature
14/06/2002	-31,68672	7,816575	0,273773	15,42537	34,76667
15/06/2002 01:00	-0,183396	7,816575	0,273773	1,975436	34,25
15/06/2002 02:00	-0,022645	7,816575	0,136886	1,901808	34
15/06/2002 03:00	-0,028751	7,816575	0,136886	1,90461	33,59167
15/06/2002 04:00	-0,027886	7,816575	0,182515	1,904121	32,89167
15/06/2002 05:00	-15,29602	7,816575	0,273773	8,321279	32,25

5.5. Comparativo de soluções SBC vs ASHRAE

Em capítulos anteriores, verificou-se que as normas SBC e ASHRAE apresentam valores distintos nos requisitos da envolvente, densidade de potência de iluminação, densidade de ocupação dos espaços e nos caudais mínimos de ar novo por pessoa e por área.

Como no capítulo anterior, Capítulo 5.4, verificou-se que o sistema de arrefecimento ativo mais eficiente a utilizar é o Sistema 5, decidiu-se efetuar um comparativo dos consumos de energia final deste, com os requisitos de ambas as normas.

Reunindo todas as especificidades de cada norma comentadas ao longo deste trabalho, apresenta-se em baixo, na Tabela 5.14, os resultados obtidos das simulações.

Tabela 5.14 - Comparativo de soluções com requisitos SBC e ASHRAE.

Requisitos da norma	Sistema de climatização	Consumo energia final (kWh.ano)	Consumo energia final (kWh/m2.ano)	Período de desconforto ASHRAE 55 (h)	Período sem cumprir SetPoint (h)	Consumo de água (m3)
SBC	5	254 603,00	59,40	339	191,75	400
ASHRAE		222 551,00	51,83	790	73	200

A tabela acima traduz a efetividade dos requisitos da norma ASHRAE 90.1 comparativamente à SBC levando a uma redução dos consumos de energia final, em cerca de 12,5%, e 50% do consumo de água para o sistema de arrefecimento evaporativo.

No entanto, relativamente à leitura das horas de desconforto que o software faz, segundo a norma ASHRAE 55, os valores da simulação com os requisitos da norma SBC são mais otimizados.

A Tabela 5.15 apresenta os dados referentes às emissões de GEE resultantes dos requisitos SBC e ASHRAE, com o mesmo sistema de arrefecimento.

Tabela 5.15 - Emissões de GEE do comparativo do sistema 5 com requisitos SBC e ASHRAE.

Sistemas ativos (SBC)	Consumo energia final (kWh)	Fator de conversão energia final para energia primária (kWhEP.kWh)	Consumo de energia primária (kWhEP)	Tipo de energia final	Fatores de conversão de energia primária para emissões de CO2 (kgCO ₂ /kWhEP)	Produção de GEE (kgCO ₂ e)
Sistema 5 - SBC	254 603,00	2,5	636 507,50	Elettricidade	0,144	91 657,08
Sistema 5 - ASHRAE	222 551,00	2,5	556 377,50	Elettricidade	0,144	80 118,36

Assumindo que o fator de conversão de energia final para energia primária seja de 2,5 kWhEP.kWh, o desvio de energia primária representa um valor de 80.13 MWhEP.

Assim, em termos de emissões de GEE e assumindo a conversão de acordo com o Despacho n.º 6476-H/2021, de 1 de julho, evita-se a emissão de 11.45 tCO₂e.

Por último, a Tabela 5.16 apresenta um quadro resumo dos sistemas de arrefecimento ativos adotados ao longo deste trabalho com os respetivos consumos energéticos, horas de desconforto térmico dos ocupantes e desagregação de consumos.

Tabela 5.591 – Quadro resumo dos consumos energéticos dos sistemas e de desconforto dos ocupantes.

Sistema	Sistema 1	Sistema 2	Sistema 3	Sistema 4	Sistema 5	ASHRAE + Sistema 5
Densidade de consumo (kWh.m ² .ano)	87,0	81,0	85,0	79,0	59,4	53,7
Eficiência relativa %	0	7%	2%	9%	32%	36%
Consumo energia final (kWh.ano)	372 759,00	347 834,00	365 465,00	341 132,00	254 603,00	222 782,00
Período de desconforto ASHRAE-55 (h)	363	347,5	385	339	339	790
Setpoint not met cooling (h)	268	505	355	319	191,75	73
Desagregação de consumos (kWh.ano)						
Iluminação interior (kWh.ano)	69 629,00	69 629,00	69 629,00	69 629,00	69 629,00	69 629,00
Equipamentos interiores (kWh.ano)	93 557,00	93 557,00	93 557,00	93 557,00	93 557,00	93 557,00
Total fixo (kWh)	163 186,00	163 186,00	163 186,00	163 186,00	163 186,00	163 186,00
Climatização	209 573,00	184 648,00	202 279,00	177 946,00	91 417,00	59 596,00
Consumo Climatização / Consumo global (%)	56%	53%	55%	52%	36%	27%

Capítulo 6

Conclusão

6.1. Sumário

Este capítulo final sumariza as principais conclusões decorrentes do trabalho realizado, através da simulação e análise de todos os dados recolhidos, explicando o impacto de cada parâmetro estudado, as técnicas de arrefecimento passivo e a otimização dos sistemas de climatização ativos.

6.2. Conclusões gerais

Ao longo deste trabalho aprofundou-se um pouco mais do que o solicitado, sendo que para além do estudo do impacto das técnicas de arrefecimento passivo e ativo para os requisitos das normas locais, SBC, fez-se também um comparativo com as recomendações da norma norte americana ASHRAE 90.1.

Adotaram-se os valores da ASHRAE em detrimento da legislação em vigor em Portugal porque aquela contém soluções para as temperaturas sentidas na Arábia Saudita, o que não acontece com a segunda.

Relativamente aos dados, existia uma confiança nos valores esperados relativamente aos sistemas de arrefecimento passivos, incluindo a inércia térmica, nomeadamente das proteções solares fixas na redução de consumos de energia final.

Contudo, não era esperado pelo autor o enorme impacto da redução da potência de projeto de arrefecimento devido à redução da absorção solar em coberturas e paredes externas, e do efeito da ventilação natural no consumo de energia final, comparativamente às restantes.

A adoção de uma solução construtiva com maior inércia térmica significou uma redução de 16% no dimensionamento de potência de equipamentos de climatização e cerca de 10% no consumo durante o período em estudo.

As combinações de restantes soluções integradas de arrefecimento passivo levaram a uma redução de 4,5% no consumo de energia final. Conjuntamente com o resultado das simulações das soluções construtivas, sistema passivo, atingiu-se cerca de 15%.

A par do dimensionamento por alteração da inércia térmica, verificou-se que a existência de insuflação de ar novo nos espaços tem um impacto muito significativo na potência de projeto para arrefecimento, adicionado em qualquer das soluções construtivas cerca de 100 kW, perfazendo mais do dobro do total das necessidades de arrefecimento.

Nos sistemas de arrefecimento ativo, verificou-se uma redução de consumo de energia final de 32% relativamente ao sistema menos eficiente e 25% mais eficiente ao sistema utilizado durante as simulações.

Verificou-se também que o sistema de distribuição de ar com arrefecimento evaporativo e com equipamentos terminais VRF foi considerado o mais eficiente. Contudo exige grandes quantidades de água para o seu funcionamento, cerca de 400 m³ para um período de 6 meses. Num local onde existe uma grande escassez de água e que se situa a cerca de 200 km de distância do mar, Golfo Pérsico, se colocar-se a hipótese de dessalinização. Este fator poderá resultar num constrangimento de recursos e consequente ponderação sobre o sistema de climatização.

Este consumo de água é apenas para o edifício do caso de estudo, Hotel.

Por fim, compararam-se simulações utilizando um mesmo sistema, Sistema 5, com os requisitos de ambas as normas SBC e ASHRAE 90.1. O resultado foi dentro do esperado quanto à redução de consumos pois a última apresenta uma maior exigência na envolvente térmica, opaca e não opaca, a densidade de ocupação por 100m² é inferior e os sistemas de iluminação também têm uma densidade de potência relativamente menor.

O consumo de água para o sistema de arrefecimento evaporativo é substancialmente menor, perto dos 200 m³.ano contra os 400 m³ da norma SBC. A maior diferença verifica-se quanto ao nível de conforto dos ocupantes, sendo que com os dados da norma ASHRAE o número de horas de desconforto é aproximadamente o dobro da encontrada na SBC.

Para poder implementar medidas de redução de consumo de energia deverá ser feito um inquérito aos ocupantes e sensibilizá-los para o facto de a unidade hoteleira pretender ser *eco-friendly* (amigo do ambiente) e como tal será necessário fazer algumas restrições e tomar como aceitável esse desvio nas condições ideais para o conforto humano.

Existem ainda muitas melhorias que poderão ser adotadas visto que as medidas adotadas foram feitas de uma forma conservadora. Na prática, poder-se-ão ajustar os perfis de utilização, as densidades de potência de iluminação e um maior controlo dos equipamentos de climatização, quer na sua regulação térmica, como na forma de atuação.

6.3. Projetos futuros

Para projetos futuros, seria importante analisar outras técnicas de arrefecimento passivo, mais especificamente na elaboração de soluções construtivas recorrendo a técnicas PCM (*Phase Change Material*) e de sistemas de tubos enterrados, como arrefecimento passivo.

Outro fator determinante verificado no decorrer das simulações seria a obtenção de um software que permita ao utilizador verificar as horas de desconforto apenas com base na temperatura, humidade e velocidade do ar, utilizando técnicas de arrefecimento passivo, sendo que no presente programa existe sempre a necessidade de ter um sistema de climatização associado para verificar essas diferenças, sob a forma de potência térmica.

Bibliografia

[1] - IRENA_WETO_Summary_2021_PT

[2]- Residential Buildings Thermal Performance to Comply with SBC 601- 2019, Engineering, Technology & Applied Science Research - Vol. 9, No. 2, 2019, 3949-3954, Faris A. AlFaraidy - Salah Azzam

[3]– International Renewable Energy Agency, 29 setembro 2019, Energy Profile Saudi Arabia

[4] - ASHRAE 90.1

[5]- Passive cooling techniques for building and their applicability in different climatic zones, 2019, Mechanical Engineering Department, Sardar Vallabhbhai National Institute of Technology, Surat, Gujarat, India, Dnyandip K. Bhamare, Manish K. Rathod*, Jyotirmay Banerjee

[6] - Green roofs for hot and dry climates: Interacting effects of plant water use, succulence and substrate, August 2012, C. Farrell *, R.E. Mitchell, C. Szota, J.P. Rayner, N.S.G. William, Department of Resource Management and Geography, The University of Melbourne,

[7] - Solar-Reflective “Cool” Walls: Benefits, Technologies, and Implementation, April 2019 | CEC-500-2019-040, California Energy Commission, Gavin Newsom, Governor

[8] - Thermal inertia in buildings A review of impacts across climate and building use, Renewable and Sustainable Energy Reviews 82 (2018) 2300–2318, Stijn Verbeke, Amaryllis Audenaert

[9] - Evaporative Cooling: A Review of its Types and Modeling, Basrah Journal for Engineering Sciences, Vol. 22, No. 1, (2022), 36-47, Rasha Hayder Hashim 1, *, Salman Hashim Hammdi 2, Adel Abid Alaziz Eidan

[10] - Thermal Performance of Building Envelope, International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT), Vol. 9 Issue 07, July-2020, Shyamal Mishra and Smita Rashmi Apeejay Institute of Technology

[11] - Sistemas de AVAC Estratégias de operação para redução de custos energéticos, fevereiro 2017, Faculdade de Engenharia do Porto, Vitor Lopes

[12] - <https://www.theseverngroup.com/cav-vs-vav-hvac-systems/>

[13] - <https://techtricro.com/a-complete-guide-to-vrf-system/>, January 9th, 2021|HVAC

[14] - Chiller Vs VRF Comparison, outubro de 2020, University of Baghdad, Mustafa Falihi

[15] - <https://www.epa.gov/rhc/geothermal-heating-and-cooling-technologies>

[16] – <http://energyplus.net>

[17] - ASHRAE 140 STD

[18] – <http://designbuilder.co.uk/helpv7.0/>

[19] - ASHRAE 55:2010

[20] - ITE50 – LNEC Laboratório Nacional de Engenharia Civil

[21] - SBC 2007

[22] - SBC 601 – ENERGY CONSERVATION REQUIREMENTS

[23] - Despacho n.º 6476-H/2021, de 1 de julho

[24] - ASHRAE Handbook 2021. Fundamentals. SI Edition

[27] - The mud traditional architecture of the Sudan and Saudi Arabia: The difference in employment techniques, Eximia Journal, Architectural Engineering Department, College of Engineering, University of Hail, Saudi Arabia, Vol. 3, 100-116, December, 2021, Ahmed Osman Ibrahim

[28] - Alshehri, F., Beck, S. orcid.org/0000-0003-2673-4179, Ingham, D. et al. (2 more authors) (2019) Comparisons between ground and air source heat pumps in hot/dry climates: Saudi Arabia as a case study. Journal of Building Engineering, 26. 100825. ISSN 2352- 7102