



Universidade de Évora

Escola de Ciências e Tecnologia

Departamento de Física

**ARMAZENAMENTO SAZONAL DE ENERGIA
SOLAR TÉRMICA DE BAIXA TEMPERATURA
PARA CLIMATIZAÇÃO DE EDIFÍCIOS**

Dorin Anatolie Golovca

Orientação: Professor Doutor Manuel Collares Pereira

Coorientação: Professor Doutor José Júlio Correia da Silva

Mestrado em Engenharia da Energia Solar

Dissertação

Évora 2016



Universidade de Évora

Escola de Ciências e Tecnologia

Departamento de Física

**ARMAZENAMENTO SAZONAL DE ENERGIA
SOLAR TÉRMICA DE BAIXA TEMPERATURA
PARA CLIMATIZAÇÃO DE EDIFÍCIOS**

Dorin Anatolie Golovca

Orientação: Professor Doutor Manuel Collares Pereira

Coorientação: Professor Doutor José Júlio Correia da Silva

Mestrado em Engenharia da Energia Solar

Dissertação

Évora 2016

Agradecimentos

Este espaço é partilhado com todos aqueles que contribuíram direta ou indiretamente para a elaboração desta dissertação.

Gostaria de destacar o papel desempenhado neste trajeto pelo meu orientador, Sr. Professor Doutor Manuel Collares Pereira. Durante este longo trajeto tive o prazer de desfrutar das faculdades académicas que todos lhe reconhecem: saber profundo sobre os temas abordados, otimismo frequente, pragmatismo, apoio e disponibilidade. Também gostaria de agradecer pelo espaço disponibilizado para a elaboração desta dissertação.

Ao Professor Doutor José Júlio Correia da Silva, responsável como coorientador desta dissertação, desejo expressar o meu agradecimento, pelo tempo disponibilizado, pelos bons conselhos e pelos conhecimentos transmitidos acerca de termos e detalhes que, entretanto, me eram desconhecidos.

O meu agradecimento vai, também, para todos os colaboradores da Cátedra Energias Renováveis pela forma amigável que me receberam e trataram durante todo este tempo. Em especial ao Engenheiro Afonso Cavaco por todo o apoio bibliográfico e ajuda no desenvolvimento desta dissertação. Agradeço também ao Doutor Diogo Canavarro, ao Doutor Hugo Silva, ao Engenheiro Luís Fialho e ao Engenheiro Tomás Fartaria pela companhia e auxílio ao longo da dissertação.

O meu reconhecimento vai, também, ao conjunto de docentes do Mestrado em Engenharia da Energia Solar da Universidade de Évora. Desejo expressar o meu agradecimento pelos conhecimentos transmitidos.

A todos os meus amigos que fizeram parte deste trajeto académico, desejo expressar a minha satisfação.

Por fim, o meu apreço pelos meus pais, Anatolie Golovca e Maria Golovca, os principais responsáveis desta longa caminhada, pelo todo o apoio, compreensão e confiança depositada.

Resumo

Face aos padrões atuais de vida, em que despendemos a maior parte do nosso tempo no interior de edifícios, com um nível de conforto que ninguém quer abdicar, urge o desenvolvimento de tecnologias de climatização sustentáveis.

Devido a uma combinação única de fatores, casas de baixo consumo de energia (e também casas passivas) em Portugal, são particularmente adequadas de explorar as vantagens da energia solar térmica, especialmente quando combinado com armazenamento sazonal de energia. No entanto nenhum exemplo documentado existe de como esta sinergia pode ser explorada com sucesso em Portugal, ilustrando assim o modo em que a necessidade de aquecimento pode ser colmatada de uma forma sustentável sem o uso de combustíveis fósseis. A energia solar é uma excelente alternativa de fonte de energia para aquecimento de edifícios. Um principal fator que limita a sua aplicação é que é uma fonte de energia com uma disponibilidade média de variação cíclica. O uso de armazenamento sazonal de energia pode reduzir substancialmente o custo do sistema solar que é capaz de fornecer até 100% das necessidades energéticas dos edifícios. Estes sistemas são projetados para armazenar a energia solar durante o verão e reter o calor armazenado para posterior utilização durante o inverno.

Palavras-chave

Armazenamento sazonal de energia

Energia solar térmica

Eficiência energética

Aquecimento solar

Conforto térmico

Climatização

Poupança

Abstract

SEASONAL SOLAR THERMAL ENERGY STORAGE FOR LOW TEMPERATURE HEATING BUILDINGS.

Given the current standards of living, where we spent most of our time inside buildings, with a level of Comfort that no one wants to give up, urges the development of sustainable climate control technologies.

Due to a unique combination of factors, low energy (and also passive) houses in Portugal are particularly well suited to exploiting the advantages of solar thermal energy especially when combined with seasonal energy storage. However no documented example there of how this synergy can be exploited successfully in Portugal, illustrating the way in which the need for heating can be addressed in a sustainable manner without the use of fossil fuels. Solar energy is an important alternative energy source for heating applications. One main factor that limits its application is that it is an energy source with an average availability of cyclical variation. The use of seasonal thermal energy storage can substantially reduce the cost of solar energy systems that can supply up to 100% of buildings energy needs. Such systems are designed to collect solar energy during the summer and retain the stored heat for use during the winter.

Key words

Seasonal energy storage

Solar thermal energy

Energy efficiency

Solar heating

Thermal comfort

Climatization

Savings

Índice

Agradecimentos	i	
Resumo	ii	
Abstract	iv	
Capítulo 1	Introdução	1
1.1	Enquadramento	2
1.2	Motivação e objetivos	3
1.3	O Sol e a energia	4
1.4	Combustíveis fósseis.....	4
1.4.1	Pico de produção de petróleo.....	5
1.5	Setor energético Português	6
1.6	Organização	8
1.7	Notação.....	9
Capítulo 2	Caracterização do recurso solar	11
2.1	Ângulos solares	12
2.1.1	Declinação solar	13
2.1.2	Ângulo horário	15
2.1.3	Altura solar e ângulo solar zenital	16
2.1.4	Nascer e pôr-do-sol e duração do dia	16
2.1.5	Ângulo de incidência	18
2.2	Radiação solar	19
2.2.1	Radiação solar fora da Atmosfera Terrestre	19
2.2.2	Radiação solar à superfície da Terra	20
2.2.3	Radiação total em superfícies inclinadas	22
Capítulo 3	Energia fornecida	25
3.1	Método de cálculo com valores médios mensais.....	26

3.1.1	Valor diário médio mensal da radiação incidente no coletor solar plano	26
3.1.2	Função utilizabilidade.....	28
3.2	Método de cálculo com valores horários de radiação	33
Capítulo 4	Comportamento térmico dos edifícios	37
4.1	Objetivos e metas dos Regulamentos de Comportamento Energético dos Edifícios	38
4.2	Zonas Climáticas	39
4.3	Necessidades nominais anuais de energia útil para aquecimento	40
4.3.1	Perdas de calor por condução através da envolvente	41
4.3.1.1	Perdas pela envolvente em zona corrente	42
4.3.1.1.1	Coeficiente de transmissão térmica	43
4.3.1.2	Elementos em contacto com locais não aquecidos	44
4.3.1.3	Perdas por pavimentos e paredes em contacto com solo	46
4.3.1.4	Pontes térmicas	47
4.3.2	Perdas de calor resultantes da renovação do ar	47
4.3.3	Ganhos térmicos úteis na estação de aquecimento	48
4.3.3.1	Ganhos térmicos brutos resultantes de fontes internas	49
4.3.3.2	Ganhos solares brutos	49
4.3.3.3	Fator de utilização dos ganhos térmicos	51
4.4	Valor máximo para as necessidades nominais anuais de energia útil para aquecimento	51
Capítulo 5	Armazenamento sazonal de energia e aplicação do método num caso real	53
5.1	Armazenamento sazonal de energia solar térmica para aquecimento de edifícios	54
5.1.1	Armazenamento sazonal em tanques de água	54
5.1.2	Razão da escolha desta solução de armazenamento de energia solar térmica	55

5.2	Aplicação do conceito num caso real em Portugal, Évora	56
5.2.1	Estrutura arquitetónica do edifício	57
5.2.2	Perdas térmicas totais do edifício	60
5.2.2.1	Perdas térmicas associadas à envolvente exterior	60
5.2.2.2	Perdas térmicas associadas à envolvente interior	62
5.2.2.3	Perdas térmicas associadas aos vãos envidraçados exteriores	62
5.2.2.4	Perdas térmicas associadas à renovação do ar	63
5.2.3	Ganhos úteis na estação de aquecimento	63
5.2.4	Necessidades nominais de aquecimento e o seu valor máximo ..	64
5.3	Dimensionamento do sistema solar térmico e do volume de armazenamento	66
5.3.1	Simulação com base em valores médios mensais de radiação	67
5.3.2	Simulação com base em valores horários de radiação	73
5.4	Análise económica	75
5.4.1	Estimativas de investimento	75
5.4.2	LCOE – Levelised Cost of Energy	76
Capítulo 6	Dimensionamento do sistema solar térmico para aquecimento de águas quentes sanitárias	81
6.1	Método de cálculo das necessidades de energia para preparação de águas quentes sanitárias	82
6.2	Dimensionamento de AQS recorrendo ao programa SolTerm	87
6.2.1	Caracterização do sistema.....	89
6.2.2	Análise energética	91
6.2.3	Análise económica.....	93
Capítulo 7	Conclusão	95
Capítulo 8	Desenvolvimentos futuros	99
	Referências Bibliográficas	101
	Anexos	103

Lista de Figuras

Capítulo 1

Figura 1.1	Necessidade mundial de energia primária. Previsão até 2050.....	6
Figura 1.2	Taxa de dependência energética de Portugal entre 205 e 2013	7
Figura 1.3	Consumo de energia final por setor. (a) Portugal. (b) UE-28	7
Figura 1.4	Energia final consumida pelo setor doméstico a partir de energia elétrica em Portugal e na União Europeia	8

Capítulo 2

Figura 2.1	Movimento anual da Terra em torno do Sol	12
Figura 2.2	Mudança anual da posição do Sol no céu (Hemisfério Norte)	13
Figura 2.3	Declinação solar ao longo do ano	14
Figura 2.4	Ilustração do ângulo horário, latitude e declinação	15
Figura 2.5	Movimento do Sol entre o nascer e o pôr-do-sol	16
Figura 2.6	Ângulo horário correspondente ao pôr-do-sol para diferentes latitudes ..	17
Figura 2.7	Duração do dia ao longo do ano, para diferentes latitudes	18
Figura 2.8	Radiação fora da atmosfera ao longo do ano, para várias latitudes	20

Capítulo 3

Figura 3.1	Função utilizabilidade. (a) $X_m = 2$ e $A = 0,1 \dots 0,4$. (b) $X_m = 4$ e $A = 0,1 \dots 0,6$	31
------------	---	----

Capítulo 4

Figura 4.1	Zonas climáticas de Verão e Inverno em Portugal Continental	39
Figura 4.2	Transferência de calor numa parede com três camadas distintas, para a situação de inverno	43

Capítulo 5

Figura 5.1	Distribuição anual da energia disponível e das necessidades de aquecimento	56
Figura 5.2	Plantas do Projeto da Residência Alcaçarias. (a) Piso 0. (b) Piso 1. (c) Piso 2. (d) Piso 3. (e) Vista aérea	57
Figura 5.3	Ciclo de carga e descarga de energia do depósito de armazenamento	66
Figura 5.4	Valores diários médios mensais da radiação incidente no coletor	67
Figura 5.5	Função utilizabilidade ao longo do ano, a medida que a temperatura do depósito varia	68
Figura 5.6	Resultado obtido da energia útil do sistema solar ($Q_{\text{mês}}$) ao longo do ano	69
Figura 5.7	Variação da temperatura da água no depósito de armazenamento ao longo do ano	71
Figura 5.8	Perdas térmicas do depósito ao longo do ano	72
Figura 5.9	Simulação da temperatura da água no depósito para um ciclo de 5 anos	72
Figura 5.10	Simulação da temperatura no depósito com base em valores horários de radiação	73
Figura 5.11	Temperatura da água no depósito ao longo do ano. Comparação entre a simulação com valores médios mensais de radiação e com valores horários de radiação	74

Capítulo 6

Figura 6.1	Curvas de $Q_{\text{mês}}/N$ e respetiva reta de carga	85
Figura 6.2	Página inicial do programa SolTerm, desenvolvido pelo LNEG	88
Figura 6.3	Configuração de sistema solar com permutador interno, retirado do programa SolTerm	90
Figura 6.4	Análise energética do sistema solar térmico, obtido através da ferramenta SolTerm	91
Figura 6.5	Análise energética otimizada do sistema solar térmico, obtido através da ferramenta SolTerm	92
Figura 6.6	Análise económica do sistema solar térmico otimizado, obtido através da ferramenta SolTerm	94

Lista de Tabelas

Capítulo 2

Tabela 2.1	Dia médio do mês e respetiva declinação solar	14
Tabela 2.2	Valores médios mensais de T_{amb} e H_h retirados em [10]. Posterior cálculo de H_o e K_h	21

Capítulo 3

Tabela 3.1	Resultados do cálculo de $Q_{mês}$ para a temperatura de entrada igual a $50^{\circ}C$	32
------------	--	----

Capítulo 4

Tabela 4.1	Critério de classificação das zonas climáticas de inverno	39
Tabela 4.2	Critério de classificação das zonas climáticas de verão	40
Tabela 4.3	Zona climática e dados climáticos de referência para o concelho de Évora	40
Tabela 4.4	Resistência térmica superficial em função do sentido do fluxo de calor	44
Tabela 4.5	Valores convencionais do coeficiente τ	45
Tabela 4.6	Valores convencionais de Ψ . (a) Paredes em contacto com o terreno. (b) Pavimentos em contacto com o terreno	46
Tabela 4.7	Valores convencionais para os ganhos internos médios	49
Tabela 4.8	Energia solar média mensal incidente numa superfície vertical na estação de aquecimento	50
Tabela 4.9	Fator de orientação	50

Capítulo 5

Tabela 5.1	Dados técnicos de armazenamento sazonal em algumas cidades europeias	55
Tabela 5.2	Área útil e pé direito médio de cada fração do edifício	60
Tabela 5.3	Perdas associadas à envolvente exterior. (a) Paredes exteriores. (b) Coberturas exteriores. (c) Pavimentos em contacto com o solo. (d) Pontes térmicas lineares	61

Tabela 5.4	Perdas associadas à envolvente interior	62
Tabela 5.5	Perdas associadas aos vãos envidraçados exteriores	63
Tabela 5.6	<i>Payback</i> em relação à eletricidade e poupanças com o sistema solar para um período de 25 anos	76
Tabela 5.7	Investimento, O&M e LCOE de várias tecnologias	78

Capítulo 6

Tabela 6.1	Temperatura máxima atingida para diferentes relações de V/A, no dia médio de Maio	82
Tabela 6.2	Energia diária fornecida em média pelo sistema solar e temperatura média final de armazenamento	86
Tabela 6.3	Resultado do dimensionamento da instalação coletiva	86
Tabela 6.4	Fração solar mensal para diferentes relações de V/A	87
Tabela 6.5	Perfil de consumo de água quente ao longo do dia e em todos os meses do ano	88
Tabela 6.6	Número de utilizadores e necessidade energética diária e mensal	89

Capítulo 7

Tabela 7.1	Influência do isolamento térmico do depósito no volume de armazenamento e área de coletores	97
------------	---	----

Lista de Acrónimos

AMT	Ano Meteorológico Típico.
AQS	Águas quentes sanitárias.
DGGE	Direção Geral de Geologia e Energia.
EPS	Poliestireno Expandido Moldado.
EUROSTAT	Gabinete de Estatísticas da União Europeia.
GD	Número de graus-dias.
LCOE	Levelised Cost of Energy.
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil.
LNEG	Laboratório Nacional de Energia e Geologia.
NZEB	Nearly Zero Energy Buildings.
RCCTE	Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios.
REH	Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação.
RSECE	Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios.
TSA	Tempo Solar Aparente.
UE	União Europeia.

Lista de Símbolos

A	Parâmetro dependente da orientação do coletor	-
A_c	Área de coletores	[m ²]
A_{dep}	Área do depósito	[m ²]
A_{ext}	Área exterior da unidade habitacional	[m ²]
A_{int}	Área interior da unidade habitacional	[m ²]
A_j	Área efetiva coletora da radiação solar da superfície com orientação j	[m ²]
A_p	Área interior útil de pavimento do edifício	[m ²]
a_1	Coefficiente de primeira ordem de eficiência do coletor	[W/m ² .°C]
a_2	Coefficiente de segunda ordem de eficiência do coletor	[W/m ² .°C]
B	Perímetro do pavimento ou parede medido pelo interior	[m]
b_o	Constante de primeira ordem do ângulo modificador de incidência	-
B_t	Custo de energia auxiliar no ano t	[€]
C_p	Calor específico do fluido	[J/kg.°C]
E_t	Estimativa de energia produzida no ano t	[kWh]
F	Fração solar	%
FF	Fator de forma	-
F'	Fator de eficiência do coletor	-
$F' \eta_o$	Rendimento ótico do coletor	-
$F' U_L$	Fator de perdas do coletor	[W/m ² .°C]
$F_R \eta_o$	Fator de extração de calor e rendimento ótico do coletor	-
$F_R U_L$	Fator de perdas do coletor	[W/m ² .°C]
G_{on}	Radiação solar fora da atmosfera medido no plano normal no dia N do ano	[W/m ²]
G_{sc}	Constante solar	[W/m ²]
G_{sul}	Valor médio mensal da energia solar média incidente numa superfície vertical orientada a sul durante a estação de aquecimento	[kWh/m ² .mês]
g_{\perp}	Fator solar do vão envidraçado para radiação incidente na perpendicular ao envidraçado	-

h	Ângulo horário num determinado instante	[°]
H_{col}	Valor diário médio mensal da radiação incidente na superfície plana	[J/m ² .dia]
H_d	Valor médio mensal da radiação difusa na horizontal	[J/m ² .dia]
H_h	Valor diário da radiação hemisférica sobre o plano horizontal	[J/m ² .dia]
H_o	Radiação total fora da atmosfera terrestre	[J/m ² .dia]
h_{sc}	Ângulo horário correspondente ao nascer e pôr-do-sol na superfície inclinada	[°]
h_{ss}	Ângulo horário ao pôr-do-sol	[°]
H_{SS}	Hora de pôr-do-sol	[h]
H_{SR}	Hora de nascer do sol	[h]
I	Energia disponível por dia no coletor	[W/m ²]
I_b	Valor horário da radiação direta incidente numa superfície normal aos raios solares	[W/m ²]
I_c	Intensidade crítica	[W/m ²]
I_{col}	Energia total incidente sobre o coletor em cada hora	[J/m ²]
I_d	Valor horário da radiação difusa incidente na horizontal	[W/m ²]
I_h	Valor horário da radiação global incidente na horizontal	[W/m ²]
I_{max}	Intensidade máxima	[W/m ²]
I_t	Investimento inicial em t=1 ou de substituição num ano específico	[€]
k	Condutividade térmica do material	[W/m.°C]
K_h	Índice de transparência	-
K_θ	Modificador de ângulo de incidência	-
L	Latitude do local	[°]
L_{pe}	Perdas de calor através dos elementos do edifício em contacto com o solo	[W/°C]
L_{pt}	Perdas de calor através das pontes térmicas	[W/°C]
M	Massa de água	[kg]
\dot{m}	Caudal de circulação do fluido no coletor por unidade de área	[kg/s.m ²]
M_t	Custo de operação e manutenção no ano t	[€]
N	Dia juliano	-
n	Tempo de vida do sistema	[ano]

N_i	Valor máximo das necessidades nominais de energia útil para aquecimento	[kWh/m ² .ano]
N_{ic}	Necessidades nominais anuais de energia útil para aquecimento	[kWh/m ² .ano]
P_d	Pé-direito médio	[m]
Q_a	Energia despendida com sistemas convencionais utilizados na preparação das AQS	[J]
Q_{ext}	Perdas de calor pelas zonas correntes das paredes, envidraçados, coberturas e pavimentos em contato com o exterior	[kWh]
Q_g	Ganhos térmicos brutos	[kWh]
Q_{gu}	Ganhos de calor úteis, resultantes da iluminação, dos equipamentos, dos ocupantes e dos ganhos solares através dos vãos envidraçados	[kWh]
Q_i	Ganhos térmicos associados a fontes internas de calor	[kWh]
q_i	Ganhos internos médios por unidade de área útil de pavimento	[W/m ²]
Q_{ina}	Perdas de calor pelas zonas correntes das paredes, envidraçados e pavimentos em contato com locais não aquecidos,	[kWh]
$Q_{mês}$	Energia útil	[J/m ² .dia]
Q_{pe}	Perdas de calor pelos pavimentos e paredes em contato com o solo	[kWh]
$Q_{perdasdep}$	Perdas térmicas do depósito	[J/dia]
Q_{pt}	Perdas de calor pelas pontes térmicas lineares existentes no edifício	[kWh]
Q_{ra}	Perdas de calor resultantes da renovação do ar	[kWh]
Q_s	Ganhos térmicos associados ao aproveitamento da radiação solar	[kWh]
Q_t	Perdas de calor por condução através da envolvente dos edifícios	[kWh]
Q_v	Perdas de calor resultantes da renovação de ar	[kWh]
R_d	Fator de radiação difusa	-
R_h	Fator da radiação global	-
R_j	Resistência térmica da camada j	[m ² .°C / W]
R_{ph}	Número de renovações horárias do ar interior (taxa de renovação nominal)	[h ⁻¹]
R_{se}	Resistência térmica superficial exterior	[m ² .°C / W]
R_{si}	Resistência térmica superficial interior	[m ² .°C / W]

r	Taxa de desconto	%
r_d	Relação entre radiação difusa horária e radiação difusa diária	-
r_h	Relação entre radiação hemisférica horária e radiação hemisférica diária	-
T	Duração do dia	[s]
T_{amb}	Temperatura ambiente	[°C]
T_{arm}	Temperatura de armazenamento	[°C]
T_{env}	Temperatura da envolvente em que se situa o depósito	[°C]
T_{in}	Temperatura de entrada	[°C]
T_o	Temperatura de saída	[°C]
T_r	Temperatura média da água da rede	[°C]
T_u	Temperatura de utilização	[°C]
t	Tempo em anos	[ano]
U	Coefficiente de transmissão térmica do elemento da envolvente	[W/m ² .°C]
U_{dep}	Fator de perdas do depósito	[W/m ² .°C]
U_L	Coefficiente global de perdas do coletor	[W/m ² .°C]
V	Volume interior da unidade habitacional	[m ³]
V_{dep}	Volume do depósito	[m ³]
X_c	Razão de intensidade crítica	-
X_j	Fator de orientação para diferentes exposições	-
X_m	Razão de intensidade máxima	-
Z_s	Ângulo azimutal	[°]

Símbolos Gregos

α	Ângulo de altura solar	[°]
β	Ângulo de inclinação da superfície em relação com a horizontal	[°]
γ	Relação entre os ganhos totais brutos e as perdas totais do edifício	-
δ	Declinação	[°]
η	Fator de utilização dos ganhos térmicos	-
ρ	Albedo do solo	-
θ	Ângulo de incidência	[°]
θ_a	Temperatura do ar do local não aquecido	[°C]
θ_{atm}	Temperatura do ar exterior ao edifício	[°C]
θ_{col}	Ângulo de incidência dos raios solares na superfície do coletor	[°]
θ_i	Temperatura no interior do edifício, referenciado a 20°C	[°C]
θ_z	Ângulo de incidência dos raios solares na horizontal	[°]
$(\tau\alpha)$	Produto transmissividade-absortividade	-
Φ	Ângulo solar zenital	[°]
ϕ	Utilizabilidade	-
Ψ	Coefficiente de transmissão térmica linear	[W/m.°C]

Introdução

Neste capítulo é apresentada uma visão atual do setor energético português e o consumo final de energia por setor. É feita uma breve introdução, acerca da energia solar e dos combustíveis fósseis, acompanhada de ilustrações gráficas de modo a facilitar e permitir uma leitura rápida. São apresentados o conceito e o enquadramento desta dissertação, bem como os motivos e a motivação. É ainda apresentada uma lista com vários objetivos a cumprir. Por fim, é descrita a forma de organização desta dissertação, e a notação utilizada

1.1 Enquadramento

A presente monografia refere-se ao estudo e viabilidade de implementação de um sistema de armazenamento sazonal de energia solar térmica, com o objetivo de climatizar unidades habitacionais em Portugal, mais precisamente na cidade de Évora. Mantendo o conceito de conforto térmico e climatização sustentável, com baixo custo, surgiu a ideia para a elaboração deste estudo. O estudo é adaptado para uma futura residência de estudantes em Évora, Residência Alcaçarias, em que o dimensionamento efetuado será com base nas plantas, alçados e cortes desse edifício. Posteriormente, os resultados obtidos, bem como as exigências a seguir, serão apresentados aos responsáveis pela Universidade de Évora.

Em alguns países com climas mais frios que o de Portugal e com maior poder económico esta solução já foi posta em prática, como é o exemplo da Alemanha, Noruega e Reino Unido, mas com limitações devidas ao clima e disponibilidade do recurso solar. Contudo, em Portugal, não existe nenhum exemplo/ estudo documentado sobre esta combinação inteligente de armazenar a energia solar durante os meses de verão para, posteriormente, ser aproveitada na estação mais fria e mais desfavorável em termos de radiação solar.

Pretende-se que o sistema em questão esteja dimensionado com uma elevada precisão, de modo a satisfazer a totalidade das necessidades de aquecimento das unidades habitacionais durante os meses de inverno, assegurando as exigências de conforto térmico de que todos gostamos. Para tal, todos os cálculos referentes às necessidades de aquecimento da habitação têm por base normas e regulamentos impostos em Portugal. Os regulamentos seguidos e respeitados são o Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios – RCCTE (Decreto-Lei n.º 80/2006 de 4 de Abril), o Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios – RSECE (Decreto-Lei n.º 79/2006 de 4 de Abril) e o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação – REH (Decreto-Lei n.º 118/2013 de 20 de Agosto).

Numa fase mais avançada, a presente dissertação apresenta o estudo de implementação de um sistema solar térmico de produção de águas quentes sanitárias (AQS) para a mesma unidade habitacional. Serão usados dois métodos de cálculo, um analítico através da técnica denominada reta de carga, e outro através do programa de dimensionamento de sistemas solares térmicos SolTerm, desenvolvido pelo Laboratório Nacional de Energia e Geologia (LNEG).

É feita uma análise económica dos dois sistemas estudados, com estimativas de investimento, *payback* e estimativas de poupanças.

É analisado com pormenor o sistema de armazenamento sazonal de energia, apresentando o LCOE para uma vida útil de 25 anos, e comparado com outros métodos de aquecimento ambiente.

1.2 Motivação e objetivos

Este estudo científico potencia a recuperação de um edifício para construção de uma residência de estudantes universitários sustentável e autossuficiente, na cidade de Évora. Como esta unidade habitacional é destinada a um número significativo de pessoas, com o objetivo de manter um nível de conforto térmico adequado e, por outro lado, reduzir o valor da fatura mensal destinado ao aquecimento, surge esta solução de implementar um sistema de armazenamento sazonal de energia solar térmica. Neste contexto, surgiu a oportunidade de estudar a viabilidade de um sistema inovador em Portugal destinado ao aquecimento habitacional. Desde à partida sabe-se que este tipo de solução é eficaz e, como já foi referido, posto em prática em alguns países nórdicos. Este trabalho procurará mostrar como faz sentido em Portugal optar por esta solução e como pode compensar faze-lo, em comparação com outras soluções convencionais.

Surgem, assim, os seguintes objetivos:

1. Estudar o recurso solar e as condições ambientais para a cidade de Évora.
2. Estudar o comportamento térmico do edifício.
3. Propor soluções de melhoria do comportamento térmico do edifício, sobretudo no que se refere ao isolamento térmico.
4. Investigar o potencial do armazenamento sazonal de energia solar térmica para climatização de edifícios em Portugal.
5. Estudo e modelação computacional da solução proposta, com base em valores médios mensais analiticamente calculados.
6. Estudo e modelação computacional da solução proposta, com base em valores horários reais da radiação solar para a região de Évora.
7. Comparação dos dois últimos pontos.

8. Dimensionamento de um sistema de aquecimento de águas quentes sanitárias (AQS).

1.3 O Sol e a energia

A radiação solar é a principal fonte de energia para a superfície da Terra, que pode ser aproveitada através de uma variedade de processos naturais e sintéticos. O mais importante é a fotossíntese, usada pelas plantas para capturar a energia da radiação solar e convertê-la em forma química. A energia está em todo o lado, o Sol oferece-nos energia todos os dias. O seu calor provoca o movimento do ar que constitui a atmosfera, gerando vento. Dois terços da superfície da Terra são compostos por água, em constante movimento. Isso é energia. A própria superfície do planeta que se desloca todos os dias, esmagando montanhas, criando novos oceanos. De uma forma simplificada, energia é movimento. Mas seja qual for a forma que assume, a maioria vem de uma fonte. Uma imensa bola de um reator nuclear de fusão a milhões de quilômetros da Terra: o Sol. A temperatura de superfície do Sol é de aproximadamente 5500 K e cerca de 74% da sua massa é hidrogénio, 25% é hélio, e o resto é composto por quantidades vestigiais de elementos mais pesados. A sua gravidade está constantemente a fundir átomos de hidrogénio no seu núcleo, transformando-os em hélio e libertando enormes quantidades de energia. Energia que, eventualmente, chega à Terra como radiação solar. O Sol é uma máquina de energia [1] e [2].

1.4 Combustíveis fósseis

A verdade é que a nossa dependência em combustíveis fósseis é um castelo de cartas. Mais cedo ou mais tarde acabará por desabar. Seja qual for o nosso problema, desde fornecimento decrescente ou independência energética, empregos, défice, segurança nacional ou alterações climáticas, uma coisa é certa: a forma como obtemos a nossa energia está a mudar de forma fundamental. O petróleo não desaparecerá tão cedo, mas se quisermos compreender o nosso desafio energético, teremos que perceber que a energia vai muito para além dos combustíveis fósseis [2].

1.4.1 Pico de produção de petróleo

A produção de petróleo convencional em 33 dos 48 maiores países produtores de petróleo já atingiu o seu pico, incluindo Kuwait, Rússia e México. A produção global de petróleo está a atingir o maior pico de todos os tempos, e acredita-se que isso pode potenciar a alteração da nossa civilização industrial nos próximos anos. Depois de mais de 50 anos de pesquisas, previsões e análises feitas pelos cientistas mais respeitados e racionais, é agora claro que a taxa a que os produtores de petróleo do mundo podem extrair petróleo está a atingir o máximo nível possível. Isto é o que se entende, de uma forma simples, por *peak oil*. Com grande esforço e despesas, o nível atual de produção de petróleo pode, eventualmente, ser mantido por mais alguns anos, mas além disso deve começar um declínio permanente e irreversível [3]. A exploração do petróleo não convencional (por exemplo o de “*fracking*” ou o extraído a grandes profundidades nos oceanos) poderá prolongar esta situação por algum tempo mas não a altera de forma fundamental.

Quanto à evolução do consumo de energia no mundo, sendo hoje em dia cerca de 85% dependente dos combustíveis fósseis, principais responsáveis pelo efeito de estufa, é expectável, segundo alguns estudos, que em 2100 esta dependência diminua drasticamente. Os desafios apresentados são enormes: reduzir rapidamente a dependência dos combustíveis poluidores e, em contrapartida, evoluir as tecnologias para aproveitamento da energia renovável e sustentável. Temos apenas de aprender como viver no nosso planeta dentro das limitações de que a Natureza nos dá. Quer seja aproveitando a força dos ventos ou transformando a própria luz solar em formas de energia renovável limpa que podemos usar dia e noite [2] e [4].

Muitas previsões têm sido feitas sobre a evolução da situação da energia até 2050, no século em curso. Em todas se pretende sublinhar que o impacto sobre o clima nos vai forçar a reduzir progressiva e drasticamente o consumo dos combustíveis fósseis, a medida que os vamos substituindo por energias renováveis. Na figura 1.1 apresenta-se uma dessas previsões. Como se pode observar a necessidade global de energia vai aumentando a medida que se caminha até 2050, em função de modelos de desenvolvimento que, não deixando de ser sustentáveis, procuram também contemplar a erradicação da pobreza e correspondem a um desenvolvimento global mais justo e equilibrado. Uma coisa é comum a todas, a energia solar, a eólica, a hídrica, a bioenergia e a geotermia é a que tem tendência a aumentar mais significativamente [4].

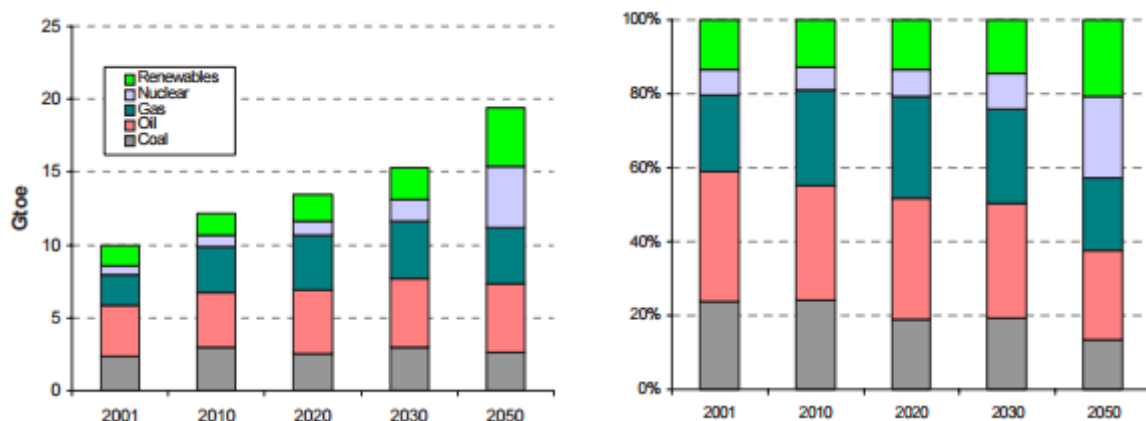


Figura 1.1 – Necessidade mundial de energia primária. Previsão até 2050 [4].

1.5 Setor energético português

Portugal é um país pobre em recursos energéticos de origem fóssil, nomeadamente, aqueles que asseguram a generalidade das necessidades energéticas na maioria dos países desenvolvidos (como o petróleo, carvão e o gás natural). A escassez de recursos fósseis conduz a uma elevada dependência energética do exterior (88,8 % em 2005), nomeadamente das importações de fontes primárias de origem fóssil, situação bem acima da média europeia. Contudo a taxa de dependência energética (energia primária) tem vindo a diminuir desde 2005, como é visível na figura 1.2. O valor mais elevado da década registou-se no ano de 2005 devido à baixa produtividade das centrais hídricas, resultado de um ano hidrológico muito seco. A subida registada em 2011 resultou sobretudo do aumento do consumo de carvão na produção de energia elétrica, para compensar a redução na produção hídrica [5].

Contudo a situação do setor energético português não é tão pessimista. Já desde 2013 que metade (em média) da produção de eletricidade no país é assegurada por energias renováveis e em 2016 durante 107 horas consecutivas Portugal atingiu uma importante meta, tendo conseguido abastecer a rede elétrica do país sem quaisquer emissões de carbono. Além das evidentes vantagens ambientais, o impacto económico foi igualmente positivo, já que reduziu a necessidade de importar carvão e petróleo.

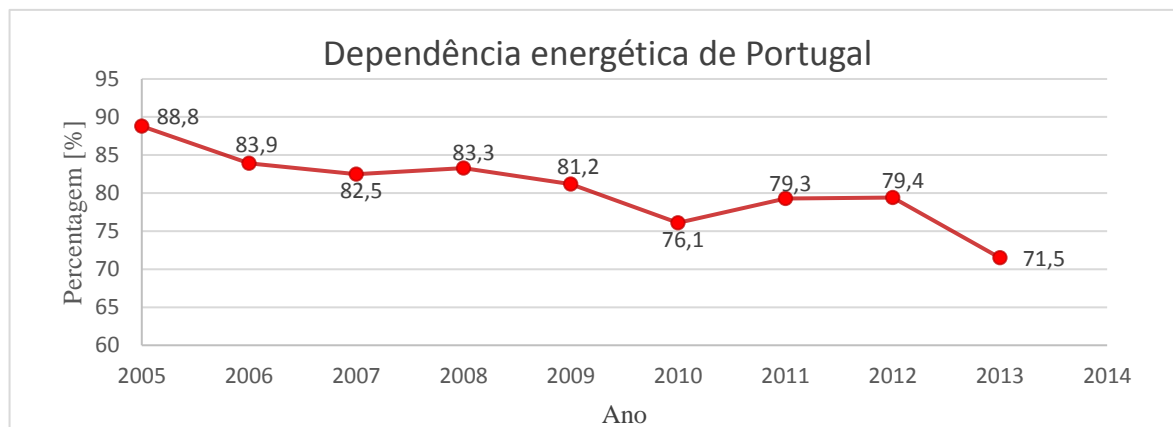


Figura 1.2 - Taxa de dependência energética de Portugal entre 2005 e 2013.

As figura 1.3(a) e figura 1.3(b) apresentam o perfil de consumo de energia final por setor em Portugal e na União Europeia, respetivamente. Segundo dados do EUROSTAT (Gabinete de Estatísticas da União Europeia), o peso do consumo dos principais setores de atividade económica relativamente ao consumo final de energia foi de, aproximadamente, 42% nos transportes, 29% na indústria, 17% no doméstico e 12% nos serviços. Consta-se assim uma forte incidência dos setores de indústria e transportes no consumo de energia final, quer em Portugal quer na média da União Europeia. O terceiro maior setor em termos de consumo é o doméstico, contando com 17 pontos percentuais em Portugal e 26 na União Europeia [6].

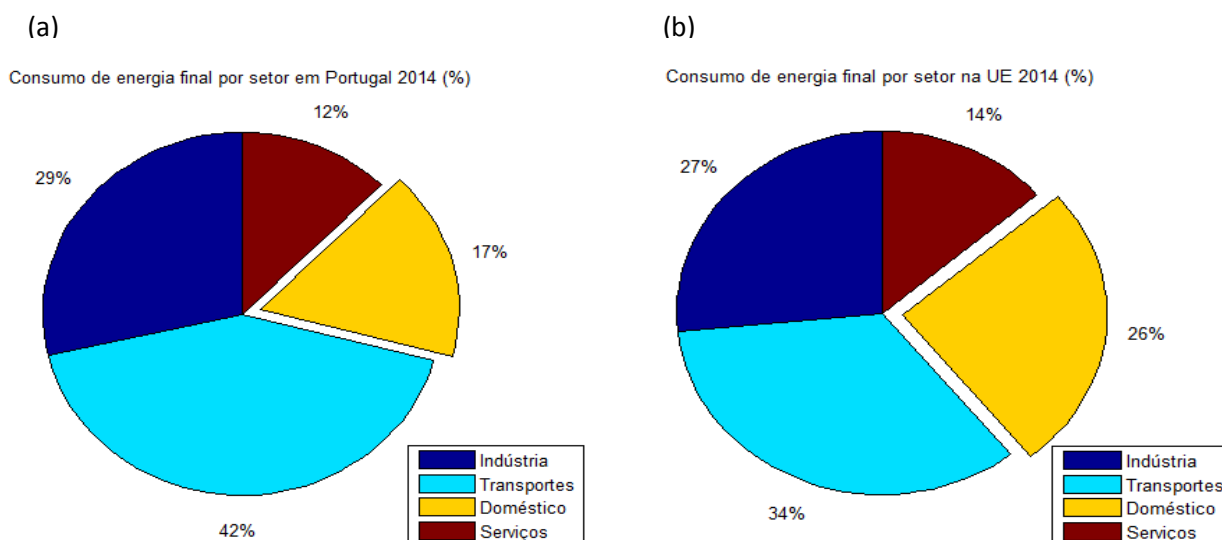


Figura 1.3 - Consumo de energia final por setor. (a) Portugal. (b) UE-28.

No que diz respeito ao perfil energético do setor doméstico, a figura 1.4 revela que a eletricidade desempenha um papel predominante, com quotas em Portugal de aproximadamente 40% [7].

Segundo dados do EUROSTAT, nas duas últimas décadas tem-se verificado um aumento do consumo de energia final pelo setor doméstico a partir da energia elétrica, tendo-se verificado em 2014 um valor de 40%, valor bem superior à média da União Europeia, aproximadamente 21% [6].

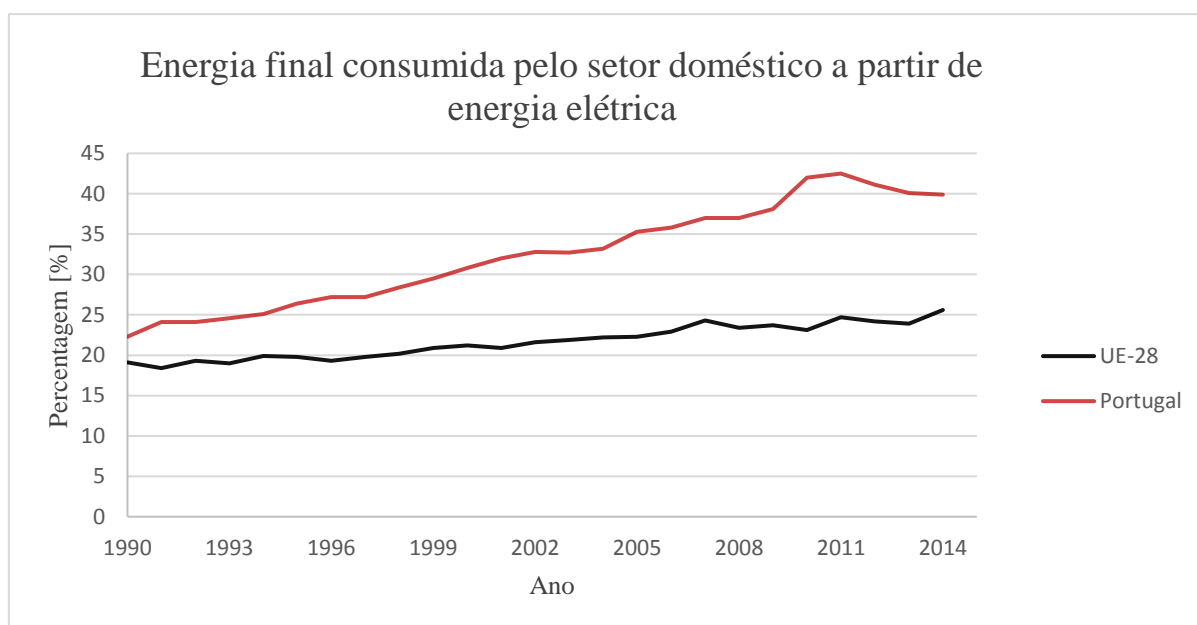


Figura 1.4 - Energia final consumida pelo setor doméstico a partir de energia elétrica em Portugal e na União Europeia.

1.6 Organização

Esta dissertação está organizada em oito capítulos de forma a facilitar a compreensão dos leitores. O capítulo 2 refere-se à caracterização do recurso solar, compreendendo como o sol varia ao longo do ano. No capítulo 3 são apresentados dois métodos de cálculo da energia fornecida, um com valores médios mensais de radiação e outro com valores horários. O capítulo 4 é destinado ao método de cálculo das necessidades nominais de energia para aquecimento do edifício. O capítulo 5 refere-se ao caso de estudo, é dimensionado o sistema de armazenamento sazonal de energia para a Residência Alcaçarias, em Évora.

O capítulo 6 é destinado ao dimensionamento do sistema solar térmico para águas quentes sanitárias. No capítulo 7 são apresentadas as principais conclusões deste trabalho. Por fim, no capítulo 8 são apresentados alguns tópicos que podem ser desenvolvidos no futuro.

1.7 Notação

Para se tornar mais fácil localizar, as figuras, tabelas e as expressões matemáticas são numeradas de uma forma sequencial e com referência ao capítulo em que são apresentadas. A escrita é com base no novo acordo ortográfico e as fontes bibliográficas são apresentadas de acordo com o estilo IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers).

Caracterização do recurso solar

Conhecimentos acerca do comportamento do Sol e do seu movimento aparente ao longo do ano são fundamentais para calcular a radiação incidente numa superfície, o ganho solar, a colocação dos coletores para evitar sombreamento e a orientação adequada dos coletores de forma a aproveitar ao máximo a energia incidente.

O objetivo deste capítulo é descrever o movimento Terra-Sol ao longo do ano e como isto afeta a energia incidente na Terra. Assim sendo, são apresentados os métodos de cálculo dos ângulos solares e da radiação solar, todos eles essenciais para este tipo de estudo. Contudo não é apresentado o método de cálculo de todos os ângulos solares, mas sim apenas dos ângulos solares necessários para este caso em concreto, sendo eles: a declinação solar, o ângulo horário, a altura solar, o ângulo zenital, o ângulo de nascer e pôr-do-sol e o ângulo de incidência. Por exemplo, o ângulo de azimute é igualmente importante para os estudos energético, porém, neste caso, não é apresentado o método de cálculo, por ser sempre considerado igual a zero, isto é, orientado a sul.

Quanto ao método de cálculo da radiação solar é, igualmente, apresentado apenas o essencial para o estudo em questão. É apresentado o método de cálculo do valor diário da radiação total disponível em cada dia sobre um plano horizontal fora da atmosfera terrestre. Ao atravessar a atmosfera terrestre há uma parte que vai ser absorvida e refletida, sendo necessário perceber quanto chega realmente à superfície da Terra. Para tal são utilizadas correlações empíricas para a radiação difusa e horizontal, de forma a estimar a distribuição da radiação. Por fim, é apresentado o método de cálculo da radiação incidente sobre superfícies inclinadas.

2.1 Ângulos solares

O movimento de rotação da Terra é o movimento giratório que o planeta Terra realiza sobre si mesma a cada 24 horas. Para além de rodar sobre si próprio, o planeta Terra descreve um movimento de translação em torno do Sol, demorando 365 dias. A partir da figura 2.1 podemos observar o que foi dito: o movimento de rotação, o movimento de translação da Terra, bem como a distância mais curta e mais longa da Terra ao Sol, considerando tratar-se do hemisfério Norte [1].

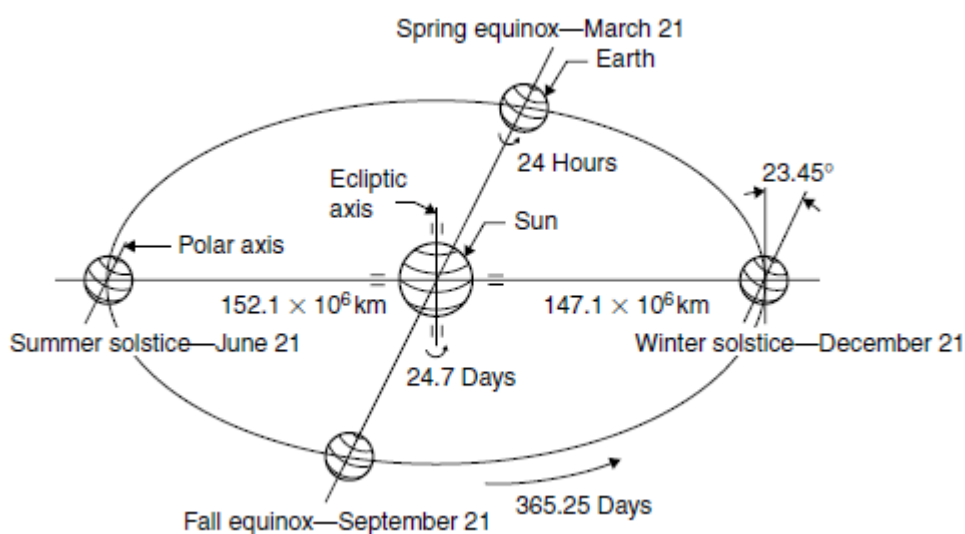


Figura 2.1 - Movimento anual da Terra em torno do Sol [1].

A órbita da Terra em torno do Sol é quase circular, sendo a distância mais longa de $152,1 \times 10^6$ km na posição afélio e a distância mais curta de $147,1 \times 10^6$ km na posição periélio, uma diferença de apenas 3,3%.

A posição do Sol no céu muda de dia para dia e de hora para hora. Os movimentos relativos da Terra e do Sol não são simples, mas eles são sistemáticos e, assim, previsíveis. É de conhecimento comum que o Sol está mais alto no céu no verão do que no inverno, como é visível na figura 2.2. Também é do conhecimento comum que, no hemisfério Norte, do solstício de inverno até ao solstício de verão, os dias vão ficando mais longos e a posição do Sol no céu mais alta, sendo o máximo correspondente ao dia do solstício de verão [1].

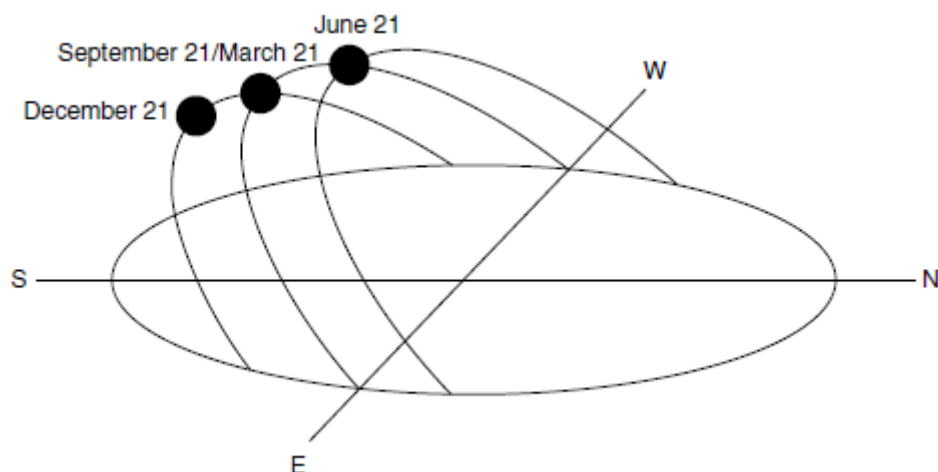


Figura 2.2 - Mudança anual da posição do Sol no céu (Hemisfério Norte) [1].

2.1.1 Declinação solar

A declinação solar, denotado por δ , varia diariamente ao longo do ano devido à inclinação da Terra sobre o seu eixo de rotação e a rotação da Terra em torno do Sol. Se o eixo de rotação da Terra fosse perpendicular ao plano da elítica (elipse descrita pelo movimento de translação da Terra), a declinação seria sempre 0° . No entanto, o eixo de rotação da Terra faz um ângulo de $23,45^\circ$ com a perpendicular ao plano da elítica e o ângulo de declinação varia mais ou menos esse valor, $+23,45^\circ$ no solstício de verão e $-23,45^\circ$ no solstício de inverno (a partir do hemisfério norte). Nos equinócios de primavera e outono a declinação solar é 0° . Este é um parâmetro importante para estimar a radiação solar incidente num dia específico.

A variação da declinação solar, em graus, para qualquer dia do ano pode ser calculada aproximadamente pela equação de Cooper [8]:

$$\delta = 23,45 \operatorname{sen} \left(360 \frac{284+N}{365} \right) \quad (2.1)$$

em que

N = dia juliano.

Por vezes, para simplificar os cálculos, é costume trabalhar-se com valores médios mensais. Portanto, a tabela 2.1 apresenta o dia central de cada mês, bem como o dia juliano e a declinação solar correspondente.

Tabela 2.1 - Dia médio do mês e respetiva declinação solar

Mês	Dia	Dia médio do mês	
		N	δ (graus)
Janeiro	i	16	-21,10
Fevereiro	31 + i	46	-13,29
Março	59 + i	75	-2,42
Abril	90 + i	105	9,41
Maio	120 + i	135	18,79
Junho	151 + i	166	23,31
Julho	181 + i	197	21,35
Agosto	212 + i	227	13,78
Setembro	243 + i	258	2,22
Outubro	273 + i	289	-9,97
Novembro	304 + i	319	-19,15
Dezembro	334 + i	350	-23,37

A variação da declinação solar (em graus) ao longo do ano pode ser visível na figura 2.3. Como se pode observar, o mínimo é $-23,45^\circ$ no solstício de inverno e o máximo é $+23,45^\circ$ no solstício de verão. Nos equinócios a declinação solar toma o valor de 0° .

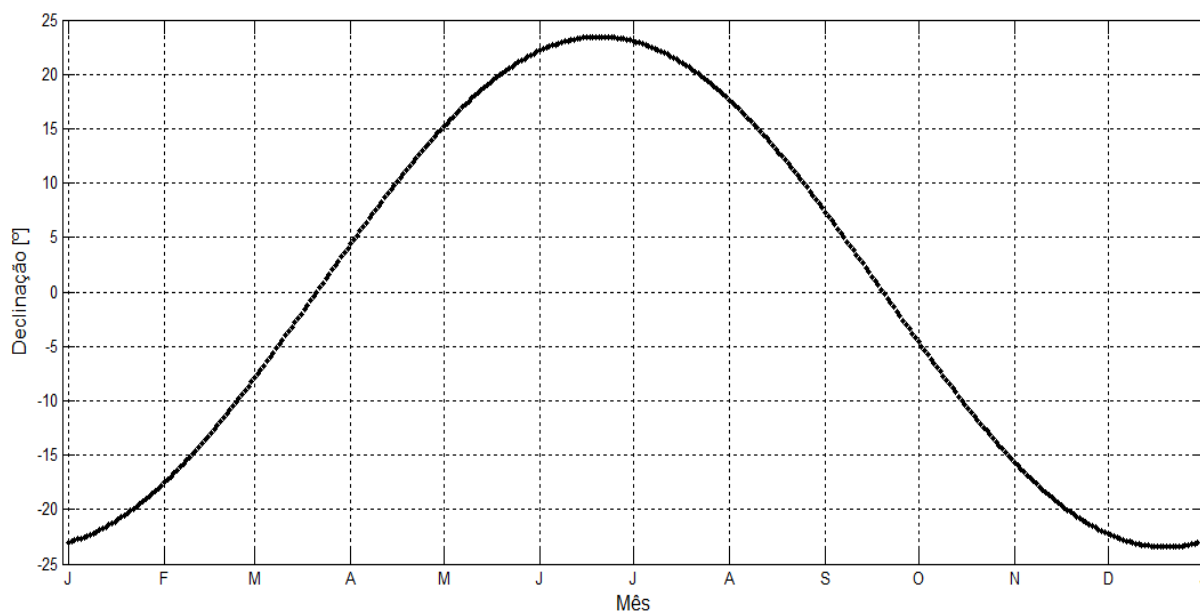


Figura 2.3 - Declinação solar ao longo do ano.

2.1.2 Ângulo horário

O ângulo horário, h , de um ponto na superfície terrestre é definido como o ângulo através do qual a Terra teria de girar para trazer o meridiano do ponto diretamente debaixo do Sol. Na figura 2.4 é visível o ângulo horário do ponto P como sendo o ângulo medido no plano equatorial terrestre entre a projeção OP e a projeção da linha central Terra-Sol. O ângulo horário ao meio dia solar local é considerado 0° , e a cada $360/24$ ou 15° de longitude equivalem a 1 hora [1].

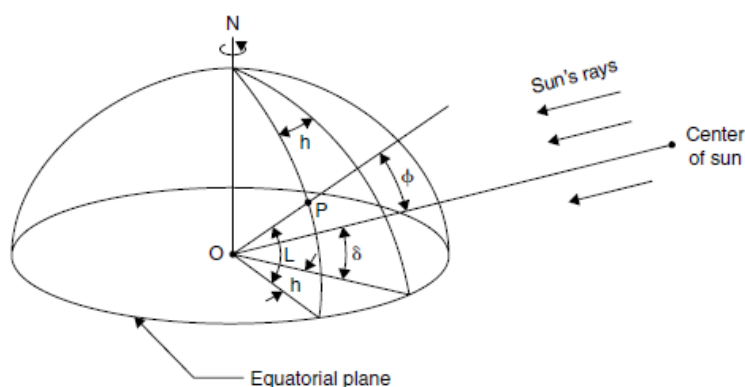


Figura 2.4 - Ilustração do ângulo horário, latitude e declinação [1].

O ângulo horário num determinado instante pode ser calculado pela seguinte equação:

$$h = \pm 0,25 \times (\text{n}^\circ \text{ de minutos em relação ao meio-dia solar local}) \quad (2.2)$$

onde o sinal mais aplica-se ao período da tarde (após o meio dia solar) e o sinal menos ao período da manhã (antes do meio dia solar) e $\frac{360}{24 \times 60} = 0,25$.

O ângulo horário também pode ser obtido a partir do tempo solar aparente (TSA):

$$h = (\text{TSA} - 12) \times 15 \quad (2.3)$$

Onde, ao meio dia solar local, $\text{TSA} = 12$ e $h = 0^\circ$.

2.1.3 Altura solar e ângulo solar zenital

O ângulo de altura solar, α , é o ângulo entre os raios solares e o plano horizontal, como pode ser visível na figura 2.5. Está relacionado com o ângulo solar zenital, Φ , que é o ângulo entre os raios solares e a vertical.

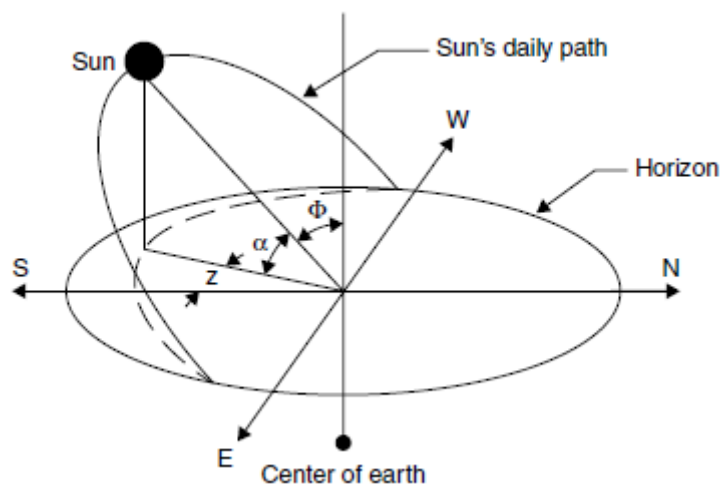


Figura 2.5 - Movimento do Sol entre o nascer e o pôr-do-sol [1].

Assim, resulta a seguinte equação:

$$\Phi + \alpha = \pi/2 = 90^\circ \quad (2.4)$$

E a expressão matemática para a altura solar e ângulo solar zenital é:

$$\sin(\alpha) = \cos(\Phi) = \sin(L)\sin(\delta) + \cos(L)\cos(\delta)\cos(h) \quad (2.5)$$

em que

L = latitude do local,

α = altura solar,

Φ = ângulo solar zenital.

2.1.4 Nascer e pôr-do-sol e duração do dia

Considera-se o nascer e o pôr-do-sol quando a altura solar é zero ($\alpha = 0$, ver figura 2.5). Portanto, o ângulo horário ao pôr-do-sol, h_{ss} , pode ser calculado a partir da equação (2.5) para $\alpha = 0^\circ$:

$$\text{sen}(\alpha) = \text{sen}(0) = 0 = \text{sen}(L)\text{sen}(\delta) + \cos(L)\cos(\delta)\cos(h_{ss})$$

simplificando:

$$\cos(h_{ss}) = - \frac{\text{sen}(L)\text{sen}(\delta)}{\cos(L)\cos(\delta)}$$

e reduzindo para:

$$\cos(h_{ss}) = - \tan(L)\tan(\delta) \quad (2.6)$$

Como o pôr-do-sol depende da latitude, na figura 2.6 está apresentada a variação do ângulo horário correspondente ao pôr-do-sol durante um ano para diferentes latitudes, 0°, 20°, 50°, 60° e para a latitude de Évora, 38,57°, linha a vermelho.

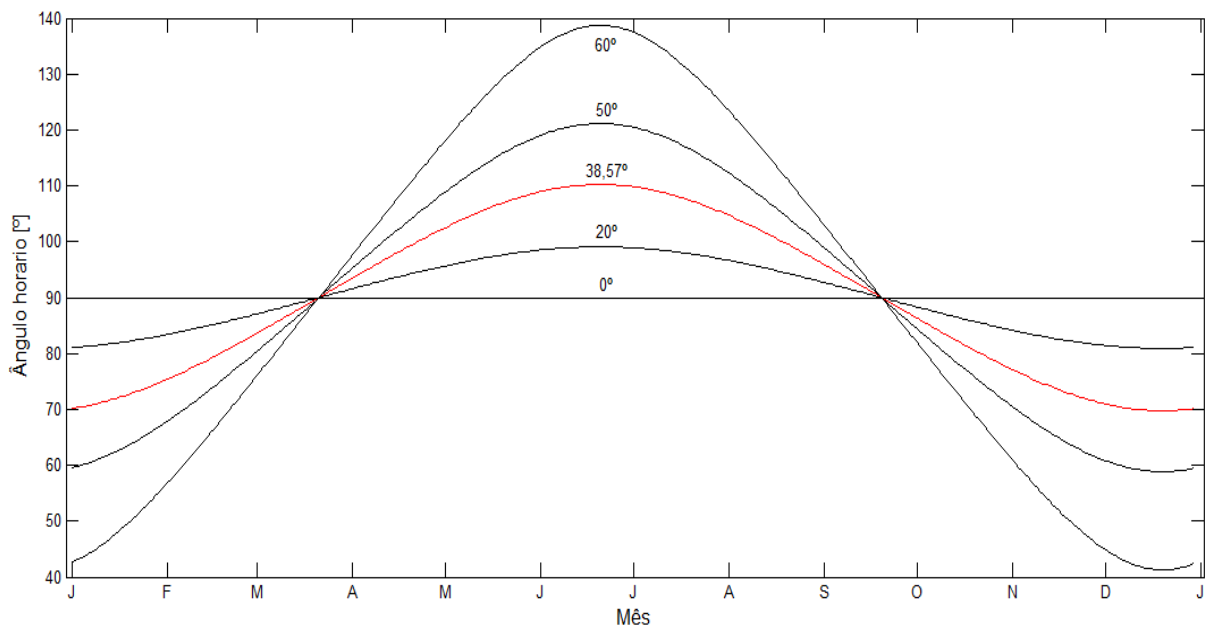


Figura 2.6 - Ângulo horário correspondente ao pôr-do-sol para diferentes latitudes.

Como já foi dito anteriormente, o ângulo horário ao meio dia solar local é considerado 0° e 15° de longitude equivalem a 1 hora, o nascer e pôr-do-sol em horas a partir do meio-dia solar local é dado por:

$$H_{SS} = -H_{SR} = 1/15 \cos^{-1} [-\tan(L)\tan(\delta)] \quad (2.7)$$

A duração do dia é duas vezes a hora do pôr-do-sol, pode ser visível na figura 2.7 para diferentes latitudes (linha a vermelho é para a latitude de Évora), e é dada pela seguinte equação:

$$\text{Duração do dia} = 2/15 \cos^{-1} [-\tan(L)\tan(\delta)] \quad (2.8)$$

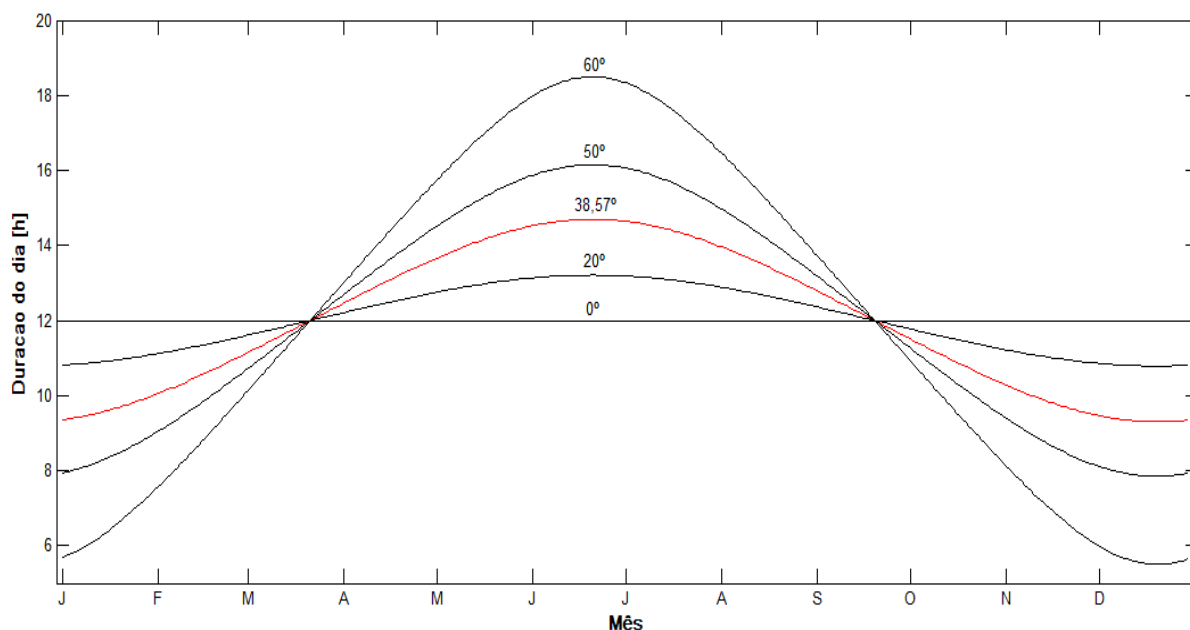


Figura 2.7 - Duração do dia ao longo do ano, para diferentes latitudes.

2.1.5 Ângulo de incidência

O ângulo de incidência, θ , é o ângulo entre os raios solares e a normal à superfície. Para o plano horizontal, o ângulo de incidência é o mesmo que o ângulo zenital. A expressão geral para o ângulo de incidência é a seguinte [9]:

$$\begin{aligned} \cos(\theta) = & \text{sen}(L)\text{sen}(\delta)\cos(\beta) - \cos(L)\text{sen}(\delta)\text{sen}(\beta)\cos(Z_s) \\ & + \cos(L)\cos(\delta)\cos(h)\cos(\beta) \\ & + \text{sen}(L)\cos(\delta)\cos(h)\text{sen}(\beta)\cos(Z_s) \\ & + \cos(\delta)\text{sen}(h)\text{sen}(\beta)\text{sen}(Z_s) \end{aligned} \quad (2.9)$$

em que

β = ângulo de inclinação da superfície em relação com a horizontal,

Z_s = ângulo azimutal.

Em certos casos podemos considerar que a superfície está virada a sul, no hemisfério norte, significa que $Z_s = 0^\circ$, e a equação 2.9 pode ser simplificada:

$$\cos(\theta) = \text{sen}(L - \beta)\text{sen}(\delta) + \cos(L - \beta)\cos(\delta)\cos(h) \quad (2.10)$$

2.2 Radiação solar

2.2.1 Radiação solar fora da Atmosfera Terrestre

A radiação solar fora da atmosfera terrestre é descrita num plano normal à direção Terra-Sol pela constante solar (G_{sc}), cujo valor médio é 1367 W/m^2 , sendo a variação da distância Terra-Sol responsável pela sua flutuação em torno do valor médio. Quando o Sol está mais perto da Terra, no periélio, a constante solar é considerada 1400 W/m^2 , e quando o Sol se encontra na posição afélio é cerca de 1330 W/m^2 . Pode ser calculada a partir de [1] e [8]:

$$G_{on} = G_{sc} \left[1 + 0,033 \cos\left(\frac{360N}{365}\right) \right] \quad (2.11)$$

em que

G_{on} = radiação solar fora da atmosfera medido no plano normal no dia N do ano,

G_{sc} = constante solar.

Para se obter o valor diário da radiação total disponível em cada dia, sobre um plano horizontal, fora da atmosfera terrestre - H_o - basta fazer a integração de G_{on} multiplicado pelo cosseno do ângulo que em cada instante a radiação faz com a normal do lugar, entre o nascer e pôr-do-sol, e temos [10] e [11]:

$$H_o = \frac{T}{\pi} G_{sc} \left[1 + 0,033 \cos\left(\frac{360N}{365}\right) \right] \cos(L) \cos(\delta) \{ \text{sen}(h_{ss}) - h_{ss} \cos(h_{ss}) \} \quad (2.12)$$

em que H_o é expresso em Joule/m^2 e em que

$T = 24 \times 3600 \text{ s}$,

h_{ss} = ângulo horário correspondente ao nascer ou pôr-do-sol.

Na figura 2.8 está representado a variação da radiação solar fora da atmosfera terrestre ao longo do ano para diferentes latitudes (0°, 20°, 50°, 60°N) inclusivamente a de Évora, representado pela linha vermelha (38,57°N).

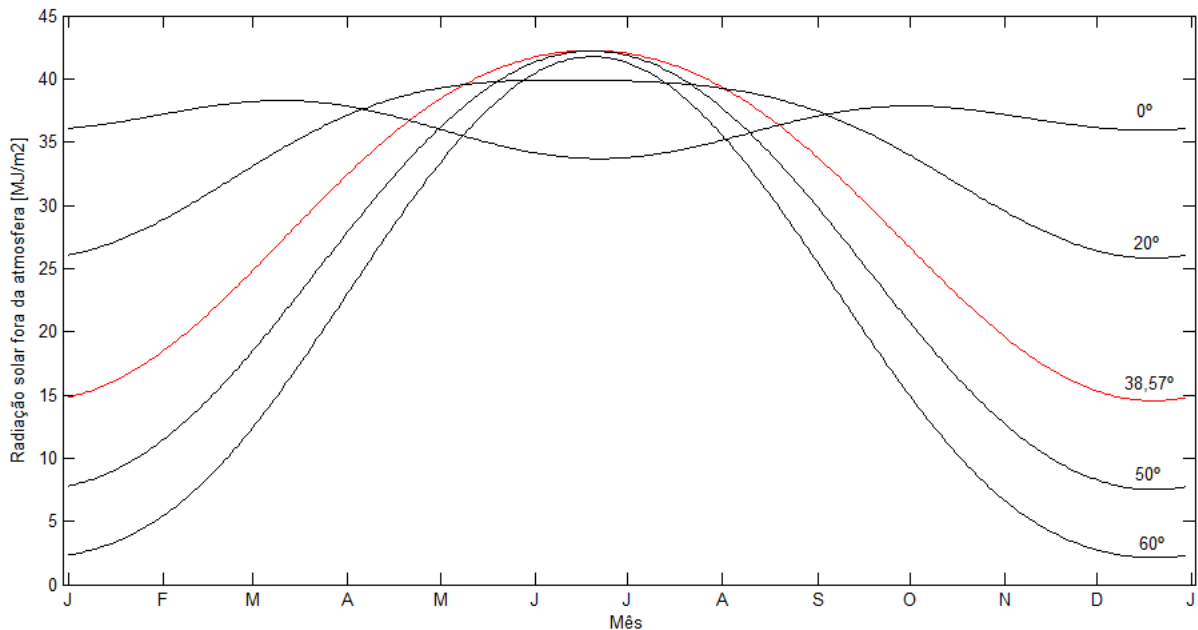


Figura 2.8 – Radiação fora da atmosfera ao longo do ano, para várias latitudes.

2.2.2 Radiação solar à superfície da Terra

Ao atravessar a atmosfera terrestre a radiação vai ser parcialmente absorvida e difundida e o total que incide sobre uma determinada superfície – radiação global ou hemisférica – é composta por duas componentes, a radiação direta e a radiação difusa. A radiação direta é aquela que vem diretamente do disco solar e a radiação difusa é toda a outra que nos chega de todos os lados do céu. Na presente monografia, uma barra horizontal sobre as letras significa que estamos a considerar valores médios. Por exemplo, $\overline{H_h}$ representa o valor médio mensal da radiação hemisférica sobre o plano horizontal. É importante, ainda, conhecer o conceito de índice de transparência (“*clearness index*”) que traduz de uma forma simples a transparência da atmosfera à radiação solar incidente no topo da atmosfera, isto é, fração da radiação extraterrestre que chega à superfície da Terra, e é definido por [11] e [12]:

$$\overline{K_h} = \frac{\overline{H_h}}{H_o} \quad (2.13)$$

em que:

\overline{H}_h = valor diário médio mensal da radiação hemisférica sobre o plano horizontal,

\overline{H}_o = valor diário médio mensal da radiação solar fora da atmosfera terrestre.

Na tabela 2.2 são apresentados os dados fornecidos em [10] da temperatura média ambiente ($\overline{T_{amb}}$ – °C), bem como do valor diário médio mensal da radiação hemisférica sobre o plano horizontal (\overline{H}_h – MJ/m²), para a região de Évora em todos os meses do ano. A partir da equação 2.12 e da equação 2.13 foi possível calcular o valor diário médio mensal da radiação solar fora da atmosfera terrestre (\overline{H}_o – MJ/m²) e o índice de transparência (\overline{K}_h), respetivamente.

Tabela 2.2 – Valores médios mensais de T_{amb} e H_h retirados em [10]. Posterior cálculo de H_o e K_h .

	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
$\overline{T_{amb}}$	8,8	9,8	12	14,1	16,2	20,2	23	23,2	21	17	12,6	9,5
\overline{H}_h	8,3	10,3	17	18,9	23,8	26,6	27,5	24,7	19	13,8	8,6	7,1
\overline{H}_o	15,97	21,13	28,08	35	39,8	41,81	40,78	36,97	30,54	23,06	17,15	14,44
\overline{K}_h	0,52	0,48	0,60	0,54	0,59	0,63	0,67	0,66	0,62	0,59	0,50	0,49

De forma a prever a “performance” do sistema solar são necessários valores instantâneos de radiação. Devido à maior parte deste tipo de dados não estarem disponíveis, podem ser utilizados dados médios diários da radiação, de modo a estimar a distribuição da radiação. Para isto, são utilizadas correlações empíricas. As correlações frequentemente utilizadas são a correlação de Liu e Jordan (1977) para a radiação difusa [12] e a correlação de Collares-Pereira e Rabl (1979) para a radiação global [11].

De acordo com Liu e Jordan,

$$r_d = \left(\frac{\pi}{24}\right) \frac{\cos(h) - \cos(h_{SS})}{\text{sen}(h_{SS}) - \left(\frac{2\pi h_{SS}}{360}\right) \cos(h_{SS})} \quad (2.14)$$

em que

r_d = relação entre radiação difusa horária e radiação difusa diária ($=I_D/H_D$).

De acordo com Collares-Pereira e Rabl,

$$r_h = \frac{\pi}{24} [a + b \cos(h)] \frac{\cos(h) - \cos(h_{SS})}{\text{sen}(h_{SS}) - \left(\frac{2\pi h_{SS}}{360}\right) \cos(h_{SS})} \quad (2.15a)$$

em que

r_h = relação entre radiação hemisférica horária e radiação hemisférica diária ($=I_H/H_H$),

e os coeficientes a e b são

$$a = 0,409 + 0,5016 \text{ sen}(h_{SS} - 60) \quad (2.15b)$$

$$b = 0,6609 - 0,4767 \text{ sen}(h_{SS} - 60) \quad (2.15c)$$

2.2.3 Radiação total em superfícies inclinadas

Normalmente os coletores não são instalados horizontalmente, mas sim com um ângulo de inclinação, de forma a aumentar a quantidade de radiação interceptada e diminuir a reflexão. O termo I_{col} é particularmente importante e é instrutivo fazer, entre parêntesis, a sua análise. O coletor encontra-se orientado e inclinado de uma determinada maneira e incide sobre ele a radiação solar direta (I_b), radiação difusa isotrópica (I_d) e ainda a radiação hemisférica refletida pelo chão (I_h). Juntando todas as contribuições temos [10]:

$$I_{col} = I_b \cos(\theta_{col}) + \frac{1}{2} I_d (1 + \cos(\beta)) + \frac{1}{2} I_h \rho (1 - \cos(\beta)) \quad (2.16a)$$

em que

I_{col} = energia total incidente sobre o coletor em cada hora,

I_b = valor horário da radiação direta incidente numa superfície normal aos raios solares,

I_d = valor horário da radiação difusa incidente na horizontal,

I_h = valor horário da radiação global incidente na horizontal,

θ_{col} = ângulo de incidência dos raios solares na superfície do coletor,

ρ = albedo do solo (tipicamente $\rho = 0,2$).

A mesma equação pode ser usada para estimar a radiação média mensal incidente, $\overline{I_{col}}$, substituindo os valores horários da radiação direta, difusa e horizontal pelas suas médias mensais. Assim, passamos a ter:

$$\overline{I_{col}} = \overline{I_b} \cos(\theta_{col}) + \frac{1}{2} \overline{I_d} (1 + \cos(\beta)) + \frac{1}{2} \overline{I_h} \rho (1 - \cos(\beta)) \quad (2.16b)$$

Onde:

$$\overline{I_d} = \overline{H_d} r_d \quad (2.17a)$$

$$\overline{I_h} = \overline{H_h} r_h \quad (2.17b)$$

$$\overline{I_b} = \frac{\overline{I_h} - \overline{I_d}}{\cos(\theta_z)} \quad (2.17c)$$

em que

θ_z = ângulo de incidência dos raios solares na horizontal,

$\overline{H_d}$ = valor médio mensal da radiação difusa na horizontal,

$\overline{H_h}$ = valor médio mensal da radiação global na horizontal,

r_d = correlação de Liu e Jordan (1977) para a radiação difusa,

r_h = correlação de Collares-Pereira e Rabl (1979) para a radiação global.

Energia fornecida

Este capítulo é dedicado inteiramente a dois métodos de cálculo do calor útil em função da temperatura do fluido de entrada. O primeiro método é com base em valores médios mensais que, com ajuda de correlações empíricas e para o dia médio mensal, conseguimos prever a performance do nosso sistema para o mês inteiro. Para tal é necessário calcular o valor diário médio mensal da radiação incidente no coletor, e qual a fração desta que, finalmente, pode ser utilizada para uma determinada temperatura de funcionamento. Neste sentido, é necessário aplicar a função utilizabilidade que é uma técnica utilizada para o cálculo do desempenho a longo prazo dos coletores solares térmicos.

É, igualmente, apresentado o método de cálculo da energia útil com base em valores horários de radiação. Neste caso, são utilizados valores reais horários de radiação para prever a performance do sistema. Outra vantagem de aplicar dois métodos é servirem como comparação entre os dois e comprovar a veracidade dos métodos aplicados.

3.1 Método de cálculo com valores médios mensais

Por vezes, para este tipo de estudo, é necessário uma base de dados de radiação horária do local em questão. Como nem sempre está ao nosso dispor, é crucial arranjar alternativas. E neste caso, por via de correlações empíricas e equações desenvolvidas, com um nível de certeza bastante elevado é possível chegar ao resultado desejado, usando valores médios mensais. Todas as equações apresentadas neste capítulo foram usadas no presente estudo.

Primeiramente é necessário conhecer bem o local, mais precisamente a sua latitude, e assumir a inclinação dos coletores. Neste caso, a inclinação é igual a latitude, de forma a simplificar o método de cálculo. É, igualmente necessário, conhecer as características dos coletores - o fator de extração de calor e rendimento ótico ($F_r \eta_o$) e o fator de perdas do mesmo ($F_R U_L$). Também são necessários os doze valores médios mensais da radiação hemisférica sobre o plano horizontal ($\overline{H_h}$) e a temperatura ambiente média mensal para Évora, presentes na tabela 2.2.

Por fim, o calor útil em função da temperatura de entrada é calculado pela seguinte expressão [10]:

$$\frac{Q_{mês}(T_{in})}{A_c} = N F_R \overline{\eta_o} \overline{H_{col}} \phi \quad (3.1)$$

em que

A_c = área de coletores,

N = número de dias do mês,

$\overline{H_{col}}$ = valor diário médio mensal da radiação incidente na superfície plana,

ϕ = utilizabilidade (valor entre zero e um).

3.1.1 Valor diário médio mensal da radiação incidente no coletor solar plano

Neste capítulo é apresentado, sucintamente, o desenvolvimento que permite obter as fórmulas simplificadas de cálculo do valor diário médio mensal da radiação incidente num coletor solar plano ($\overline{H_{col}}$). A título exemplificativo é apresentada a expressão mais simples deste valor para

o coletor solar plano virado a sul e com inclinação igual à latitude, considerando que a componente difusa da radiação solar é isotrópica.

Considerando que a componente difusa da radiação é isotrópica, a radiação incidente numa superfície plana é dada pela expressão 2.16a e o valor diário médio mensal da radiação incidente nessa mesma superfície plana é dado por [10]:

$$\overline{H_{col}} = \sum_{i=1}^n \frac{T}{2\pi} \int_{h_{sc-}}^{h_{sc+}} I_{col} dh \quad (3.2)$$

em que n é o número de dias do mês e em que h_{sc+} e h_{sc-} são os ângulos horários correspondentes aos instantes em que o coletor começa a receber e deixa de receber radiação.

Invertendo a ordem entre o somatório e o integral na equação 3.2, temos:

$$\overline{H_{col}} = \frac{T}{2\pi} \int_{h_{sc-}}^{h_{sc+}} \sum_{i=1}^n I_{col} dh = \frac{T}{2\pi} \int_{h_{sc-}}^{h_{sc+}} \overline{I_{col}} dh \quad (3.3)$$

em que

$\overline{I_{col}}$ = média mensal do valor horário da radiação incidente na superfície.

Considerando que para um mês e para uma determinada hora o valor de $\cos(\theta_{col})$ não varia significativamente, o seu valor médio pode ser substituído pelo valor num determinado dia – dia médio do mês – podemos considerar $\overline{I_{col}}$ dado pela expressão 2.16b, e os valores horários médios mensais da radiação difusa, global e normal direta são dados pelas expressões 2.17a, 2.17b e 2.17c, respetivamente.

Por fim, substituindo, na equação 3.3 as equações 2.16b, 2.17a, 2.17b e 2.17c, $\overline{H_{col}}$ é dado por:

$$\overline{H_{col}} = (R_h - R_d \frac{\overline{H_d}}{\overline{H_h}}) \overline{H_h} \quad (3.4)$$

em que

$\frac{\overline{H_d}}{\overline{H_h}}$ = rácio entre radiação difusa e global para superfície horizontal,

R_h = fator de radiação global,

R_d = fator de radiação difusa.

Segundo a correlação de Collares-Perreira e Rabl, a razão entre a radiação difusa e global na horizontal é expressa em termos do índice de transparência ($\overline{K_h}$) e considerando o ângulo horário do nascer e pôr-do-sol (h_{ss} em graus) e é dado por [1]:

$$\frac{\overline{H_d}}{\overline{H_h}} = 0,775 + 0,00653(h_{ss} - 90) - [0,505 + 0,00455(h_{ss} - 90)] \cos(115\overline{K_h} - 103) \quad (3.5)$$

Os fatores de radiação R_h e R_d são calculados através das seguintes expressões:

$$R_h = \frac{1}{d} \left\{ \left[\frac{1}{\cos(L)} + \frac{1}{2}\rho(1 - \cos(\beta)) \right] [a \sin(h_{sc}) + \frac{b}{2}(\sin(h_{sc}) \cos(h_{sc}) + h_{sc})] - \frac{1}{2}\rho(1 - \cos(\beta)) \cos(h_{ss}) (a h_{sc} + b \sin(h_{sc})) \right\} \quad (3.6a)$$

$$R_d = \frac{1}{d} \left\{ \left[\frac{1}{\cos(L)} - \frac{1}{2}(1 + \cos(\beta)) \right] \sin(h_{sc}) + \frac{1}{2}(1 + \cos(\beta)) h_{sc} \cos(h_{ss}) \right\} \quad (3.6b)$$

Em que h_{sc} é o ângulo horário correspondente ao nascer e pôr-do-sol na superfície inclinada, e é dado por:

$$h_{sc} = \min(h_{ss}, 90).$$

Os coeficientes a e b são dados pelas expressões 2.15b e 2.15c, respetivamente, e o coeficiente d é dado por:

$$d = \sin(h_{ss}) - h_{ss} \cos(h_{ss}) \quad (3.7)$$

3.1.2 Função utilizabilidade

O conceito utilizabilidade (*utilizability*), ϕ , foi originalmente desenvolvido por Whillier [13] e é uma técnica utilizada para o cálculo do desempenho a longo prazo dos coletores solares térmicos. Este método foi baseado em estatísticas de radiação solar e os cálculos necessários tiveram de ser feitos para intervalos horários para cada mês. Mais tarde, o trabalho desenvolvido

por Collares-Pereira e Rabl [14] reduziu a complexidade do método e tornou-o mais útil. A necessidade de cálculos horários foi eliminada e introduziram o conceito de utilizabilidade diária média mensal, $\bar{\phi}$.

O termo utilizabilidade traduz a fração da energia total disponível no coletor que, finalmente, pode ser utilizada para uma determinada temperatura de funcionamento do coletor. ϕ é função da temperatura de funcionamento e das condições climáticas e, porque este método se aplica a outros tipos de coletores (concentradores, por exemplo), é função do tipo de coletor. Após ser feita uma análise detalhada, conclui-se que ϕ pode ser aproximado com um rigor de alguns por cento pela seguinte função:

$$\phi(X_c) = \left(1 - \frac{X_c}{X_m}\right)^{(X_m - AX_c)} \quad (3.8)$$

em que A é um parâmetro dependente da orientação do coletor e que é calculado como veremos adiante, devendo verificar determinadas condições que são:

$$A < \min[(1 + e^{-2})^{-1}; 0,86(1 - X_m^{-1})]$$

ou

$$A < \min[(1 + e^{-2})^{-1}; (1 - X_m^{-1})]$$

A segunda condição é menos restritiva que a primeira e para utilizações que envolvam níveis críticos baixos é suficiente para que a função utilizabilidade dê um valor correto da fração de energia fornecida pelo coletor acima do nível crítico considerado e também do tempo de funcionamento do sistema.

A variável X_c – razão de intensidade crítica – contém a dependência na temperatura e é o quociente entre a energia perdida pelo coletor durante o funcionamento e a energia disponível por dia, contendo assim informação sobre as características do coletor e sobre o clima. A palavra crítico vem do facto de a energia captada ter de ser maior que a de perdas para haver energia útil.

A variável X_m – razão de intensidade máxima – é o quociente entre a radiação máxima incidente no coletor e a energia disponível por dia. A radiação máxima incidente no coletor I_{max} pode

considerar-se o valor 1000 W/m^2 como uma boa aproximação para qualquer mês. É este valor que será adotado aplicando este método.

X_c e X_m são dados por:

$$X_c = \frac{I_c}{\bar{I}} \quad (3.9a)$$

$$X_m = \frac{I_{max}}{\bar{I}} \quad (3.9b)$$

com:

$$I_c = \frac{F_R U}{F_R \eta_o} (T_{in} - T_{amb}) \quad (3.10)$$

$$\bar{I} = \frac{\overline{H_{col}}}{T} \quad (3.11)$$

Voltando ao parâmetro A, ele depende apenas da inclinação do coletor desde que este tenha um azimute entre $\pm 45^\circ$. A dependência de A na inclinação é dada por:

$$A(\beta) = A(\beta=0) + A' \text{sen}\left(\frac{\pi}{2} \frac{\beta}{\beta'}\right) \quad (3.12)$$

em que:

$$\beta' = \min\left(\frac{\pi}{2}, 2L-\delta\right) \quad (3.13)$$

$$A(\beta=0) = -0,274 + 0,211X_m(\beta=0) \quad (3.14a)$$

$$A(\beta=\beta') = -0,551 + 0,438X_m(\beta=0) \quad (3.14b)$$

$$A' = A(\beta=\beta') - A(\beta=0) \quad (3.14c)$$

com:

$$X_m(\beta=0) = 1,453\overline{K_h}^{-0,765} \quad (3.15)$$

Na figura 3.1 a e b temos a representação gráfica da equação 3.8 para valores de $X_m=2$ e $X_m=4$, respectivamente, e para diferentes valores de A o que permite um cálculo gráfico rápido de ϕ .

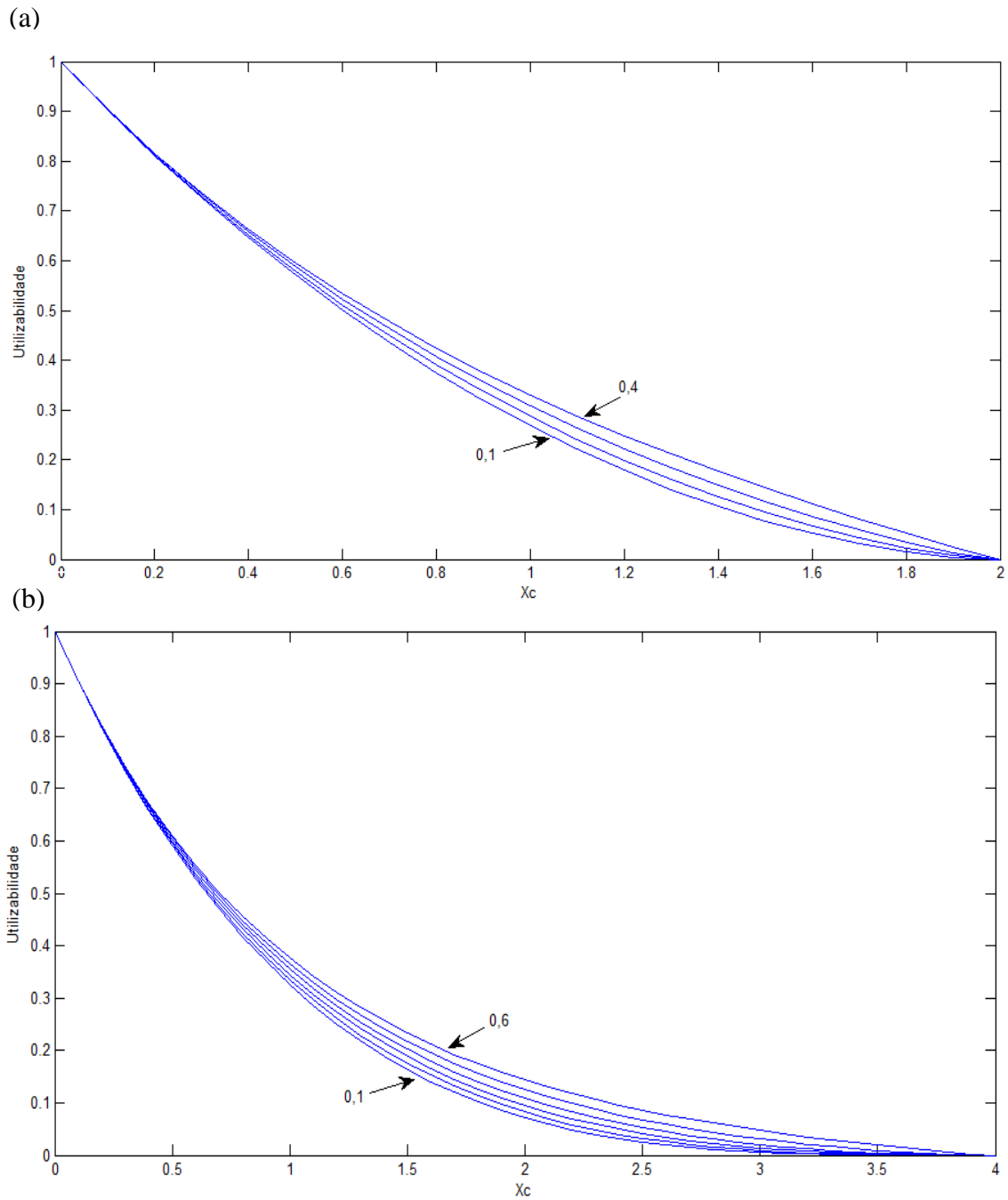


Figura 3.1 – Função utilizabilidade. (a) $X_m = 2$ e $A = 0,1 \dots 0,4$. (b) $X_m = 4$ e $A = 0,1 \dots 0,6$.

Após uma rápida análise da figura 3.1 e atendendo ao significado físico da utilizabilidade podemos identificar duas propriedades que caracterizam esta função. Essas propriedades são:

1. $\phi(X_c=0) = 1$. Para nível crítico zero a utilizabilidade é igual a 1, isto é, para nível crítico zero toda a energia absorvida pelo recetor é utilizável.
2. $\phi(X_c = X_m) = 0$. Para nível crítico máximo a utilizabilidade é nula, isto é, quando a temperatura de funcionamento é tal que o nível crítico é igual ou superior à radiação máxima incidente no coletor, logo não há qualquer energia útil.

Nesta secção foram apresentadas todas as equações necessárias para o cálculo correto da energia útil mensal $Q_{mês}$. Resumindo, procede-se ao cálculo de h_{sc} , R_h , R_d , $\frac{\overline{H_d}}{\overline{H_h}}$, $\overline{H_{col}}$, X_m , A , X_c , ϕ e $Q_{mês}/N$.

Na tabela 3.1 estão apresentados os resultados do cálculo de $Q_{mês}(T_{in}=50^\circ\text{C})$, de uma forma exemplificativa, recorrendo ao método de cálculo com valores médios mensais, para uma latitude de $38,57^\circ$ (Évora). h_{sc} é apresentado em graus, H_{sc} em horas, $\overline{H_{col}}$ e $Q_{mês}$ em $\text{MJ}/\text{m}^2\cdot\text{dia}$.

Tabela 3.1 - Resultados do cálculo de $Q_{mês}$ para a temperatura de entrada igual a 50°C .

	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
h_{sc}	72,08	79,14	88,07	90	90	90	90	90	90	81,94	73,93	69,84
H_{sc}	4,8	5,3	5,9	6	6	6	6	6	6	5,5	4,9	4,7
$\frac{\overline{H_d}}{\overline{H_h}}$	0,36	0,4	0,35	0,42	0,4	0,38	0,36	0,35	0,35	0,34	0,38	0,37
R_h	2,12	1,72	1,35	1,08	0,91	0,84	0,87	1	1,23	1,59	2	2,27
R_d	1,27	0,85	0,46	0,17	0,01	-0,06	-0,03	0,09	0,33	0,71	1,15	1,42
$\overline{H_{col}}$	13,78	14,21	20,29	19,08	21,66	22,97	24,27	23,9	21,28	18,61	13,5	12,37
X_m	2,51	2,67	2,08	2,26	1,99	1,88	1,78	1,81	2,03	2,11	2,63	2,71
A	0,436	0,483	0,335	0,41	0,342	0,304	0,27	0,275	0,318	0,342	0,462	0,476

X_c	0,718	0,746	0,55	0,564	0,468	0,389	0,334	0,336	0,409	0,484	0,682	0,762
ϕ	0,477	0,469	0,559	0,558	0,612	0,665	0,704	0,702	0,652	0,602	0,499	0,461
$Q_{m\acute{e}s}/N$	4,57	4,63	7,88	7,41	9,22	10,61	11,88	11,67	9,65	7,79	4,68	3,96

3.2 Método de cálculo com valores horários de radiação

Neste subcapítulo é apresentado o método de cálculo do calor útil com valores horários da radiação global, difusa e direta. Os valores horários de radiação, bem como de temperatura ambiente, foram gerados pelo software Meteonorm. Meteonorm é uma referência meteorológica abrangente, que nos fornece dados meteorológicos para qualquer parte do mundo, correspondentes ao Ano Meteorológico Típico (AMT) [15].

As variáveis climáticas mudam significativamente de ano para ano e, desta forma, a geração de um Ano Meteorológico Típico para representar um longo período de dados é de crucial importância para o setor energético. O Ano Meteorológico Típico consiste na determinação estatística dos meses individuais de dados meteorológicos que melhor representam as condições meteorológicas tomando como base a climatologia de um período de 30 anos [16].

É possível prever o comportamento térmico de um coletor solar a partir das características obtidas em ensaios, rendimento ótico - $F'\eta_o$ e fator de perdas - $F'U_L$. Estes valores têm de ser fornecidos pelo fabricante [17]. Para coletores planos F' varia tipicamente entre 0,9 e 0,95. Quando se pretende trabalhar com temperaturas de entrada, T_{in} , necessitamos de estimar $F_R\eta_o$ e F_RU_L , o que se faz recorrendo às equações seguintes para a obtenção de F_RU_L e $F_R\eta_o$, respetivamente:

$$F_R = \frac{\dot{m}C_p}{U_L} [1 - \exp(\frac{-U_L F'}{\dot{m}C_p})] \quad (3.16a)$$

$$F_R\eta_o = \frac{F_R U_L}{F' U_L} F'\eta_o \quad (3.16b)$$

em que

\dot{m} = caudal de circulação do fluido no coletor por unidade de área,

C_p = calor específico do fluido,

F' = fator que traduz a eficiência com que se dá a transferência de energia da placa recetora para o fluído circulante,

U_L = coeficiente global de perdas do coletor.

Em rigor, a energia $Q_{mês}(T_{in})$ calcula-se sabendo qual é, em cada hora, a energia incidente no coletor e qual a fração desta (rendimento ótico) que o coletor absorve, deduzindo depois as perdas que este tem à temperatura em questão. Os cálculos são repetidos para cada dia do mês e somados os resultados de modo a obter o total mensal.

Este cálculo é descrito analiticamente pela seguinte expressão:

$$\frac{Q_{mês}}{A_c} = \sum_{mês} \sum_{dias} \sum_{horas} [F_R \eta_o I_{col} - F_R U_L (T_{in} - T_{amb})]^+ \quad (3.17)$$

Em que o sinal positivo indica que só se consideram para o somatório contribuições positivas, isto é, quando a energia absorvida pela superfície recetora é maior que as perdas globais do coletor para o ambiente [10].

Este método torna-se muito mais complexo que o anteriormente descrito, tornando-se impossível de ser feito a mão, já que temos 8760 dados de radiação e de temperaturas ambiente e a temperatura de entrada varia de hora para hora. Os valores $F' \eta_o$ e $F' U_L$ são determinados, no ensaio do coletor, para a incidência normal dos raios solares. A utilização da expressão 3.17 no método de cálculo pressupõe o conhecimento de $F' \eta_o$ para as diferentes horas do dia, isto é, para diferentes ângulos de incidência dos raios solares no coletor, o que eleva ainda mais a complexidade do método. Neste caso $\eta_o = \tau \alpha$, designa-se por rendimento ótico e é produto da transmissividade do vidro e da absortividade da placa. Quanto ao α , é uma característica própria da placa absorSORA tomando tipicamente o valor de $\alpha = 0,94$. Quanto ao τ , é uma característica do vidro e que varia com a variação do ângulo de incidência devido à lei de Snell. Esta variação pode ser calculada analiticamente a partir da seguinte equação [18]:

$$K_\theta = \frac{(\tau \alpha)}{(\tau \alpha)_n} = 1 - b_o \left[\frac{1}{\cos(\theta_{col})} - 1 \right] \quad (3.18)$$

em que

b_o = característica do vidro do coletor. Tipicamente para coletores com uma única cobertura de vidro, o fator b_o pode ser considerado 0,1 [19].

Quanto ao $\cos(\theta_{col})$, para uma superfície inclinada e azimute igual a zero temos a seguinte expressão:

$$\cos(\theta_{col}) = \cos(\delta)\cos(L - \beta)\cos(h) + \sin(L - \beta)\sin(\delta) \quad (3.19)$$

Em que h é considerado 15° por cada hora a partir do meio-dia solar.

Relativamente ao cálculo do I_{col} é utilizada a equação 2.16a e, em que, I_b , I_d e I_h representam os valores horários da radiação direta incidente numa superfície normal aos raios solares, da radiação difusa incidente na horizontal e da radiação global incidente na horizontal, respetivamente. Como já foi referido, todos estes valores de radiação, bem como as temperaturas ambiente foram retirados do software Meteonorm.

Por fim, para a resolução da expressão 3.17, é necessário calcular qual é a temperatura de entrada do fluido em cada hora, se a condição + é satisfeita e, por fim, calcular qual o calor útil em cada hora ou em cada dia.

Comportamento térmico dos edifícios

Este capítulo é destinado principalmente ao método de cálculo aplicado para as necessidades nominais anuais de energia útil para aquecimento. Inicialmente são apresentados os objetivos e as metas dos regulamentos do comportamento energético dos edifícios. Os regulamentos são importantes como forma de promover a eficiência energética e na medida em que é necessário haver uma uniformidade na construção dos novos edifícios, de maneira a respeitarem os requisitos necessários para satisfazer o conforto térmico e de forma a não ser ultrapassado o valor máximo admissível para as necessidades nominais anuais de energia para aquecimento. Como as limitações impostas dependem da zona climática e da morfologia da unidade habitacional, é feito um zonamento climático de Portugal e, com mais detalhe, para a cidade de Évora. Por fim é apresentado o método de cálculo do limite máximo das necessidades nominais anuais de energia útil para aquecimento.

Apesar da legislação atualmente em vigor se tratar do Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação (REH), é importante referir que as metodologias de cálculo aplicadas nesta dissertação são com base no Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE), pois alguns parâmetros pretendidos se enquadram melhor no RCCTE, como por exemplo a temperatura interior de referência. Enquanto o método de cálculo do REH é com base na temperatura do ar interior de 18°C, no RCCTE a temperatura interior de referência é de 20°C, sendo, esta última, a temperatura interior desejada para o caso de estudo.

4.1 Objetivos e metas dos regulamentos de comportamento energético dos edifícios

O Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE), aprovado pelo Decreto-Lei n.º. 40/90, de 6 de Fevereiro, foi o primeiro instrumento legal que em Portugal impôs requisitos ao projeto de novos edifícios e de grandes remodelações por forma a salvaguardar a satisfação das condições de conforto térmico nesses edifícios sem necessidades excessivas de energia quer no Inverno quer no Verão [20].

Mais de uma dezena de anos passados, RCCTE veio a ser atualizado através do Decreto-Lei n.º. 80/2006, de 4 de Abril e o principal objetivo continua a ser claro, que as exigências de conforto térmico, tanto na estação de aquecimento como de arrefecimento, e de ventilação para garantir a qualidade do ar no interior dos edifícios, bem como as necessidades de água quente sanitária, possam vir a ser satisfeitas sem dispêndio excessivo de energia. O DL 80/2006 é um dos diplomas legais que transpõe para a regulamentação portuguesa a Diretiva Europeia 2002/91/CE [20].

Também a União Europeia, com objetivos semelhantes, publicou a 4 de Janeiro de 2003 a Diretiva n.º. 2002/91/CE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 16 de Dezembro, relativa ao desempenho energético dos edifícios, que, entre outros requisitos, impõe aos Estados membros o estabelecimento e atualização periódica de regulamentos para melhorar o comportamento térmico dos edifícios novos e reabilitados, obrigando-os a exigir a implementação de todas as medidas pertinentes com viabilidade técnica e económica [20].

Esta Diretiva, do Parlamento Europeu e do Conselho, foi reformulada e atualizada, com a publicação da Diretiva n.º. 2010/31/UE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 19 de maio de 2010. Veio clarificar alguns dos princípios do texto inicial e introduzir novas disposições que visam o reforço do quadro de promoção do desempenho energético nos edifícios, à luz das metas e dos desafios acordados pelos Estados-Membros para 2020 [21].

Quanto à legislação nacional, em 2013 foi aprovado o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação (REH), através do Decreto-Lei n.º. 118/2013 de 20 de agosto. Neste regulamento, além de atualização dos requisitos de qualidade térmica, são introduzidos requisitos de eficiência energética para os principais tipos de sistemas técnicos dos edifícios. Ficam, assim, igualmente sujeitos a padrões mínimos de eficiência energética, os sistemas de climatização, de preparação de água quente sanitária, de iluminação, de aproveitamento de energias renováveis de gestão de energia [21].

Neste contexto, surge igualmente o conceito de edifício com necessidades quase nulas de energia (NZEB – *Nearly Zero Energy Buildings*), o qual passará a constituir o padrão para a nova construção a partir de 2020 ou de 2018, no caso de edifícios novos de entidades públicas, bem como uma referência para as grandes intervenções no edificado existente. Este padrão pretende o abastecimento energético através do recurso a energia de origem renovável [21].

4.2 Zonas Climáticas

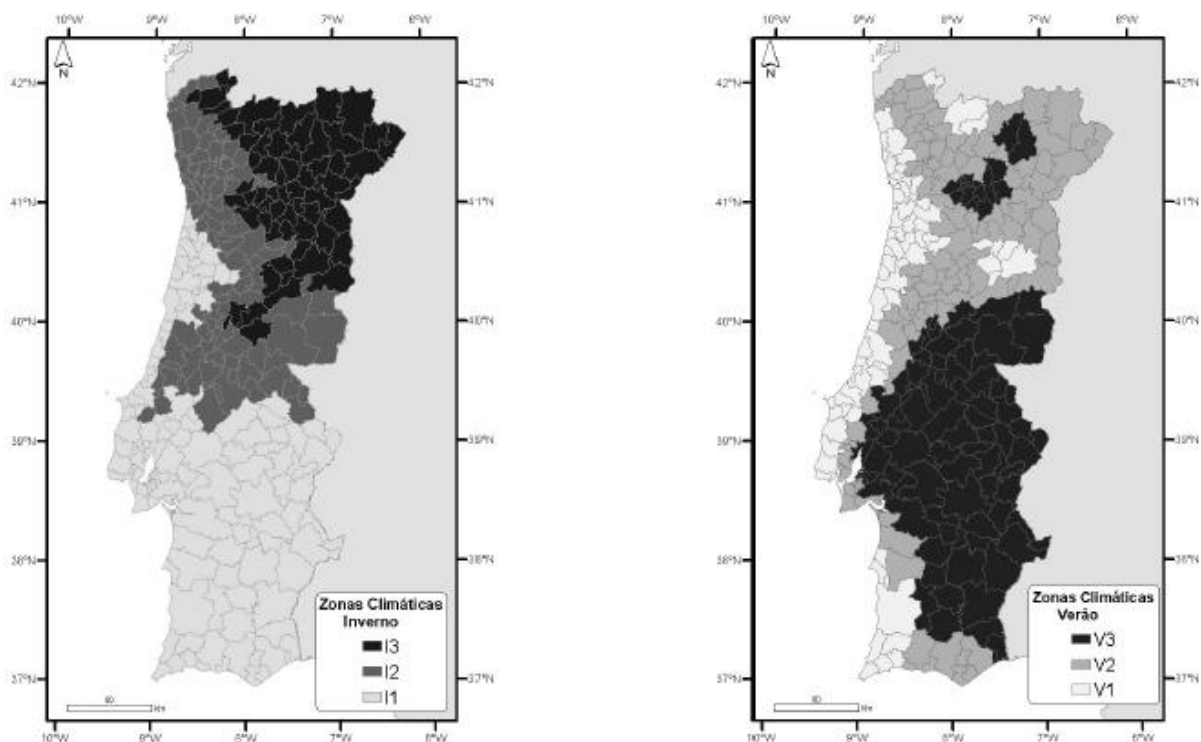


Figura 4.1 – Zonas climáticas de Verão e Inverno em Portugal Continental [20].

O País é dividido em três zonas climáticas de inverno (I_1 , I_2 e I_3) e em três zonas climáticas de verão (V_1 , V_2 e V_3), tal como pode ser visto na figura 4.1.

As zonas climáticas de inverno são definidas a partir do número de graus-dias (GD) na base de 20°C, correspondente à estação de aquecimento, conforme a tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Critério de classificação das zonas climáticas de inverno.

Critério	$GD \leq 1500$	$1500 < GD \leq 1800$	$GD > 1800$
Zona	I1	I2	I3

As zonas climáticas de verão são definidas a partir da temperatura média exterior correspondente à estação convencional de arrefecimento ($\theta_{ext,v}$), conforme a tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Critério de classificação das zonas climáticas de verão.

Critério	$\theta_{ext,v} \leq 20^{\circ}\text{C}$	$20^{\circ}\text{C} < \theta_{ext,v} \leq 22^{\circ}\text{C}$	$\theta_{ext,v} > 22^{\circ}\text{C}$
Zona	V1	V2	V3

Na tabela 4.3 é visível, para a cidade de Évora, as zonas climáticas de inverno e verão, bem como o número de graus-dias (GD), a duração da estação de aquecimento, a temperatura exterior e a amplitude térmica.

Tabela 4.3 – Zona climática e dados climáticos de referência para o concelho de Évora.

Concelho	Zona climática de Inverno	Número de graus-dias (GD) ($^{\circ}\text{C.dias}$)	Duração da estação de aquecimento (meses)	Zona climática de Verão	Temperatura exterior ($^{\circ}\text{C}$)	Amplitude térmica ($^{\circ}\text{C}$)
Évora	II	1390	5,7	V3	35	17

4.3 Necessidades nominais anuais de energia útil para aquecimento

As necessidades nominais de aquecimento de uma fração autónoma de um edifício são a energia útil que é necessário fornecer-lhe para manter permanentemente no seu interior a temperatura do ar de referência de 20°C , durante toda a estação convencional de aquecimento. Este método para além de prever necessidades energéticas reais de um edifício (ou de uma fração autónoma de um edifício), o valor das necessidades nominais, calculado para condições de referência, constitui uma forma objetiva de comparar edifícios desde a fase de licenciamento, do ponto de vista do comportamento térmico: quanto maior o seu valor mais energia é necessário consumir para o aquecer até a temperatura de conforto. As necessidades nominais anuais de energia útil para aquecimento são determinadas de acordo com as disposições da norma europeia EN ISO 13790, sendo feitas as adaptações permitidas por essa norma para melhor se ajustar à realidade da construção e da prática de utilização dos edifícios em Portugal [20].

As necessidades nominais de aquecimento resultam do valor integrado na estação de aquecimento da soma algébrica de três parcelas:

- 1) Perdas de calor através da envolvente dos edifícios,
- 2) Perdas de calor por ventilação,
- 3) Ganhos de calor úteis.

A expressão geral para o cálculo do valor das necessidades nominais anuais de energia útil para aquecimento do edifício, N_{ic} , é descrita por:

$$N_{ic} = (Q_t + Q_v - Q_{gu}) / A_p \quad (4.1)$$

em que

Q_t = perdas de calor por condução através da envolvente dos edifícios,

Q_v = perdas de calor resultantes da renovação de ar,

Q_{gu} = ganhos de calor úteis, resultantes da iluminação, dos equipamentos, dos ocupantes e dos ganhos solares através dos vãos envidraçados,

A_p = área interior útil de pavimento do edifício.

4.3.1 Perdas de calor por condução através da envolvente

A transferência de calor, em qualquer caso, acontece devido a uma diferença de temperatura. O caso dos edifícios não foge à regra, na estação de aquecimento há uma troca de calor pela envolvente, entre o interior e o exterior devido à diferença de temperatura. Neste caso, registam-se perdas de calor através da envolvente, isto é, pelas paredes, pelos envidraçados, pela cobertura e pelo pavimento. A expressão que descreve estas perdas através da envolvente do edifício é a seguinte:

$$Q_t = Q_{ext} + Q_{lna} + Q_{pe} + Q_{pt} \quad (4.2)$$

em que

Q_{ext} = perdas de calor pelas zonas correntes das paredes, envidraçados, coberturas e pavimentos em contato com o exterior,

Q_{lna} = perdas de calor pelas zonas correntes das paredes, envidraçados e pavimentos em contato com locais não aquecidos,

Q_{pe} = perdas de calor pelos pavimentos e paredes em contato com o solo,

Q_{pt} = perdas de calor pelas pontes térmicas lineares existentes no edifício.

4.3.1.1 Perdas pela envolvente em zona corrente

Dentro das perdas térmicas do edifício esta é a que ocupa a maior parcela, e trata-se dos elementos em contato com o exterior. São elas as perdas pelas zonas correntes das paredes, pontes térmicas planas, envidraçados, coberturas e pavimentos exteriores e são calculadas pela seguinte expressão:

$$Q_{ext} = U A (\theta_i - \theta_{atm}) \quad (4.3a)$$

em que

U = coeficiente de transmissão térmica do elemento da envolvente,

A = área do elemento da envolvente, medido pelo interior,

θ_i = temperatura no interior do edifício, referenciado a 20°C,

θ_{atm} = temperatura do ar exterior ao edifício.

Durante toda a estação de aquecimento, a energia necessária para compensar estas perdas, expresso em kWh, é calculada pela seguinte expressão:

$$Q_{ext} = 0,024.U.A.GD \quad (4.3b)$$

Em que GD é o número de graus-dias de aquecimento, especificado para a cidade de Évora na tabela 4.3. O método de cálculo do coeficiente de transmissão térmica (U) é descrito mais adiante, e depende das características de cada elemento da envolvente. Para uma certa área da envolvente do edifício, quanto menor o coeficiente de transmissão térmica dos materiais da envolvente, menor será a necessidade de energia para compensar estas perdas do edifício.

4.3.1.1.1 Coeficiente de transmissão térmica

O coeficiente de transmissão térmica de elementos constituídos por um ou vários materiais, em camadas de espessura constante, é calculado pela seguinte fórmula:

$$U = \frac{1}{R_{total}} = \frac{1}{R_{si} + \sum R_j + R_{se}} \quad (4.4a)$$

em que

R_j = resistência térmica da camada j ,

R_{si} e R_{se} = resistências térmicas superficiais interior e exterior, respetivamente.

Tratando-se de camadas de materiais homogêneas, a resistência térmica R_j é calculada como sendo o quociente entre a espessura da camada j , x_j (m), e o valor da condutividade térmica do material que a constitui, k_j (W/m.°C), tal como pode ser visto na seguinte equação:

$$R_j = \frac{x_j}{k_j} \quad (4.4b)$$

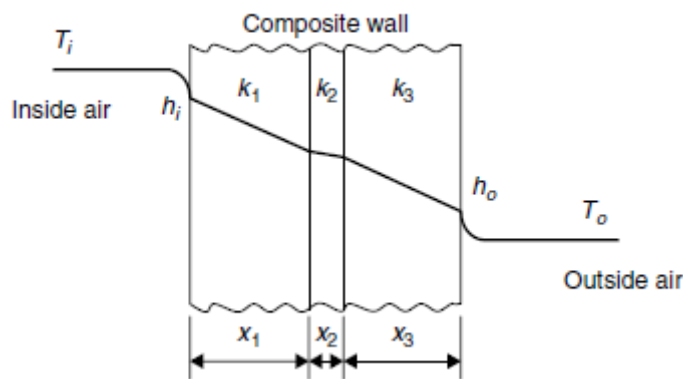


Figura 4.2 – Transferência de calor numa parede com três camadas distintas, para a situação de inverno [1].

Na figura 4.2 está representado, a título exemplificativo, uma parede com três camadas diferentes, em que é necessário calcular as três resistências térmicas e fazer o somatório para, posteriormente, ser calculado o coeficiente de transmissão térmica deste elemento.

A simbologia h_i e h_o é considerada, neste caso, como sendo as condutâncias térmicas superficiais interior e exterior, respetivamente. Os valores das resistências térmicas superficiais

em função da posição do elemento construtivo e do sentido do fluxo de calor constam na tabela 4.4.

A publicação do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), com o título, *Coefficientes de Transmissão Térmica de Elementos da Envolvente dos Edifícios* [22] contém uma listagem extensa do valor dos coeficientes de transmissão térmica (U) dos elementos de construção mais comuns, obtidos segundo este método de cálculo. Portanto, sempre que necessário, os valores a considerar para os cálculos são os valores tabelados nesta publicação.

Tabela 4.4 – Resistência térmica superficial em função do sentido do fluxo de calor.

Sentido do fluxo de calor	Resistência térmica superficial		
	Exterior	Local não aquecido	Interior
	Rse	Rse	Rsi
Horizontal	0,04	0,13	0,13
Vertical:			
Ascendente	0,04	0,10	0,10
Descendente	0,04	0,17	0,17

4.3.1.2 Elementos em contacto com locais não aquecidos

Neste contexto consideram-se as perdas pelas zonas correntes das paredes, envidraçados e pavimentos que separam um espaço aquecido de um espaço não aquecido (Q_{lna}), como por exemplo, sótãos, arrecadações, escadas ou garagens. Estas perdas são calculáveis analiticamente através da seguinte expressão:

$$Q_{lna} = U A (\theta_i - \theta_a) \quad (4.5a)$$

em que

θ_a = temperatura do ar do local não aquecido e toma um valor intermédio entre a temperatura atmosférica exterior e a temperatura da zona aquecida.

Durante toda a estação de aquecimento, a energia necessária para compensar estas perdas é, para cada elemento da envolvente em contacto com um local não aquecido, calculada pela expressão:

$$Q_{lna} = 0,024.U.A.GD.\tau \quad (4.5b)$$

Em que τ é o quociente entre a diferença de temperatura entre o espaço interior e o local não aquecido e a diferença de temperatura entre o espaço interior e o espaço exterior. A temperatura interior também é considerada. Dada a dificuldade em conhecer com precisão o valor da temperatura do local não aquecido sem fixação de alguns parâmetros de difícil previsão dependentes do uso concreto e real de cada espaço, admite-se que τ pode tomar os valores convencionais indicados na tabela 4.5.

Tabela 4.5 – Valores convencionais do coeficiente τ .

Tipo de espaço não útil	A_i / A_u		
	De 0 a 1	De 1 a 10	Maior que 10
1 - Circulação comum:			
1.1 - Sem cobertura direta para o exterior	0,6	0,3	0
1.2 - Com cobertura permanente para o exterior:			
a) Área de aberturas permanentes / volume total < 0,05	0,8	0,5	0,1
b) Área de aberturas permanentes / volume total \geq 0,05	0,9	0,7	0,3
2 - Espaços comerciais	0,8	0,6	0,2
3 - Edifícios adjacentes	0,6	0,6	0,6
4 - Armazéns	0,95	0,7	0,3
5 - Garagens:			
5.1 - Privada	0,8	0,5	0,3
5.2 - Coletiva	0,9	0,7	0,4
5.3 - Pública	0,95	0,8	0,5
6 - Varandas, marquises e similares	0,8	0,6	0,2
7 - Coberturas sobre desvão não habitado			
7.1 - Desvão não ventilado	0,8	0,6	0,4
7.2 - Desvão fracamente ventilado	0,9	0,7	0,5
7.3 - Desvão fortemente ventilado		1	

A_i é definido como sendo a área do elemento que separa o espaço útil interior do espaço não útil e A_u como sendo a área do elemento que separa o espaço não útil do ambiente exterior.

4.3.1.3 Perdas por pavimentos e paredes em contacto com o solo

Este espaço é dedicado às perdas unitárias de calor através dos elementos do edifício em contacto com o solo (L_{pe}), como por exemplo, pavimento ou parede em contacto com o terreno.

Estas perdas são calculadas pela seguinte expressão:

$$L_{pe} = \sum \Psi_j \cdot B_j \quad (4.6a)$$

em que

Ψ = coeficiente de transmissão térmica linear,

B = perímetro do pavimento ou parede medido pelo interior.

Os valores do coeficiente de transmissão térmica linear, para diferentes geometrias, são apresentados nas tabelas 4.6a e 4.6b para paredes e pavimentos em contacto com o solo, respetivamente.

Tabela 4.6 – Valores convencionais de Ψ . (a) Paredes em contacto com o terreno. (b) Pavimentos em contacto com o terreno.

(a)

Z (m)	Ψ					
	Coeficiente de transmissão térmica da parede, U					
	De 0,40 a 0,64	De 0,64 a 0,99	De 1 a 1,19	De 1,20 a 1,49	De 1,50 a 1,79	De 1,80 a 2
Menor que -6	1,55	1,9	2,25	2,45	2,65	2,75
De -6 a -3,05	1,35	1,65	1,9	2,05	2,25	2,5
De -3 a -1,05	0,8	1,1	1,3	1,45	1,65	1,75
De -1 a 0	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8

(b)

Z (m)	Ψ
Menor que -6	0
De -6 a -1,25	0,5
De -1,20 a 0	1,5
De 0,05 a 1,50	2,5

Durante toda a estação de aquecimento, a energia necessária para compensar estas perdas lineares é, para cada elemento da envolvente em contacto com o solo, calculada pela seguinte expressão:

$$Q_{pe} = 0,024 L_{pe} GD \quad (4.6b)$$

4.3.1.4 Pontes térmicas

Ponte térmica é um termo que designa toda e qualquer zona da envolvente dos edifícios em que a resistência térmica é significativamente alterada em relação à zona corrente. Essa alteração pode ser causada pela existência localizada de materiais de diferentes condutibilidades térmicas ou por uma modificação na geometria da envolvente, como é o caso das ligações entre diferentes elementos construtivos (por exemplo: interseção de duas paredes verticais). As perdas de calor através das pontes térmicas lineares são calculadas pela seguinte expressão:

$$L_{pt} = \sum \Psi_j \cdot B_j \quad (4.7a)$$

em que

B_j = desenvolvimento linear da ponte térmica j , medido pelo interior.

Os valores tabelados do coeficiente de transmissão térmica linear da ponte térmica são apresentados no anexo 2, onde são apresentados os valores de Ψ para vários casos e situações mais correntes na construção em Portugal.

Durante toda a estação de aquecimento a energia necessária para compensar estas perdas térmicas lineares é, para cada ponte térmica da envolvente, calculada pela seguinte expressão:

$$Q_{pt} = 0,024 \cdot L_{pt} \cdot GD \quad (4.7b)$$

4.3.2 Perdas de calor resultantes da renovação do ar

Com o objetivo de fazer cumprir e melhorar a qualidade do ar do interior dos edifícios foi criada a Norma NP 1037-1, que define regras a que devem obedecer os sistemas de ventilação natural dos edifícios de habitação [23]. Por razões de higiene e conforto dos ocupantes, é necessário que os edifícios sejam ventilados em permanência por um caudal mínimo de ar, em que a taxa

de renovação mínima necessária é de 0,6 renovações por hora. Nesse sentido, as fachadas dos edifícios devem dispor de dispositivos de admissão de ar auto-reguláveis que garantam os caudais nominais específicos. As perdas de calor por unidade de tempo correspondentes à renovação do ar interior (Q_{ra}) são calculadas pela seguinte expressão:

$$Q_{ra} = 0,34 \cdot R_{ph} \cdot A_p \cdot P_d (\theta_i - \theta_{atm}) \quad (4.8a)$$

em que

R_{ph} = número de renovações horárias do ar interior (taxa de renovação nominal),

P_d = pé-direito médio.

Durante toda a estação de aquecimento, a energia necessária para compensar estas perdas é calculada através da seguinte expressão:

$$Q_v = 0,024 (0,34 \cdot R_{ph} \cdot A_p \cdot P_d) \cdot GD \quad (4.8b)$$

4.3.3 Ganhos térmicos úteis na estação de aquecimento

Os ganhos térmicos de uma unidade habitacional devem-se devido a dois fatores – ganhos térmicos associados a fontes internas de calor, Q_i , e ganhos térmicos associados ao aproveitamento da radiação solar, Q_s . Assim sendo, os ganhos térmicos brutos na estação de aquecimento podem ser contabilizados com base na seguinte expressão:

$$Q_g = Q_i + Q_s \quad (4.9a)$$

Tendo em conta que nem todos os ganhos térmicos brutos se traduzem em aquecimento útil do ambiente interior do edifício, surge a necessidade de definir um fator de utilização dos ganhos térmicos, η , definido mais adiante. Assim, os ganhos térmicos úteis são calculados através da seguinte expressão:

$$Q_{gu} = \eta Q_g \quad (4.9b)$$

4.3.3.1 Ganhos térmicos brutos resultantes de fontes internas

Quanto aos ganhos térmicos internos brutos, Q_i , podem ser considerados os ganhos de calor associados ao metabolismo dos ocupantes e o calor dissipado nos equipamentos do interior do edifício, bem como o calor dissipado nos dispositivos de iluminação. A expressão que permite calcular os ganhos de calor de fontes internas durante toda a estação de aquecimento é a seguinte:

$$Q_i = 0,720 q_i M A_p \quad (4.9c)$$

em que

q_i = ganhos internos médios por unidade de área útil de pavimento, e os valores convencionais para diferentes tipologias de edifícios são apresentados na tabela 4.7,

M = duração média da estação convencional de aquecimento, apresentado na tabela 4.3.

Tabela 4.7 – Valores convencionais para os ganhos internos médios.

Tipo de edifício	q_i [W/m ²]
Residencial	4
Serviços: escritórios, comércio, consultorias, etc	7
Hotéis	4
Outros edifícios com pequena carga de ocupação	2

4.3.3.2 Ganhos solares brutos

Os ganhos solares brutos consideráveis são através dos vãos envidraçados. O fator de orientação dos vãos envidraçados é importante considerar, visto que, os vãos virados a sul aproveitam melhor a radiação solar do que os vãos envidraçados virados a norte. O cálculo dos ganhos solares brutos pode ser feito por dois métodos, um detalhado e um simplificado. De forma a dispensar um cálculo exaustivo vão a vão e para cada orientação, o método de cálculo simplificado é válido desde que sejam satisfeitas algumas condições, como por exemplo, não existir nem obstruções nem sombreamentos por elementos do edifício [20].

Seguindo esta lógica, o método de cálculo simplificado, na estação de aquecimento, dos ganhos solares brutos é descrito pela seguinte expressão:

$$Q_s = G_{sul} \sum_j [X_j \cdot 0,46 \cdot A_j \cdot g_{\perp}] M \quad (4.10)$$

em que

G_{sul} = valor médio mensal da energia solar média incidente numa superfície vertical orientada a sul durante a estação de aquecimento, apresentado na tabela 4.8,

X_j = fator de orientação para diferentes exposições, apresentado na tabela 4.9,

A_j = área efetiva coletora da radiação solar da superfície com orientação j ,

g_{\perp} = fator solar do vão envidraçado para radiação incidente na perpendicular ao envidraçado.

Tabela 4.8 – Energia solar média mensal incidente numa superfície vertical na estação de aquecimento.

	Energia solar média incidente numa superfície vertical orientada a sul na estação de aquecimento [kWh/m ² .mês]		
	Zona de inverno		
	I1	I2	I3
Continente	108	93	90
Açores	70	50	50
Madeira	100	80	80

Tabela 4.9 – Fator de orientação.

	Octante N	Octante NE e NW	Octante E e W	Octante SE e SW	Octante S	Horizontal
X	0,27	0,33	0,56	0,84	1	0,89

Quanto ao fator solar do vão envidraçado, g_{\perp} , é um valor que representa a relação entre a energia solar transmitida para o interior através do vão envidraçado em relação à radiação solar incidente na direção normal ao envidraçado. No cálculo do fator solar de vãos envidraçados do setor residencial deve ser considerada a existência, pelo menos, de cortinas interiores muito

transparentes de cor clara, e nesse caso, $g_{\perp} = 0,70$ para vidro simples incolor e $g_{\perp} = 0,63$ para vidro duplo incolor. No anexo 3 são apresentados valores comuns do fator solar de vários envidraçados típicos sem dispositivos de proteção solar, para diferentes espessuras e características.

4.3.3.3 Fator de utilização dos ganhos térmicos

O fator de utilização dos ganhos térmicos, η , está relacionado com a inércia térmica do edifício e com a relação entre os ganhos térmicos brutos do edifício e as necessidades brutas de aquecimento do mesmo. Pode ser calculado de acordo com a seguinte equação:

$$\begin{cases} \eta = \frac{1 - \gamma^a}{1 - \gamma^{a+1}} & \text{se } \gamma \neq 1 \\ \eta = \frac{a}{a + 1} & \text{se } \gamma = 1 \end{cases} \quad (4.11a)$$

em que

$a = 1,8$ se se tratar de edifícios com inércia térmica fraca,

$a = 2,6$ se se tratar de edifícios com inércia térmica média,

$a = 4,2$ se se tratar de edifícios com inércia térmica forte.

e

$$\gamma = \frac{\text{Ganhos térmicos brutos}}{\text{Nec.brutas de aquecimento}} = \frac{Q_g}{Q_t + Q_v} \quad (4.11b)$$

4.4 Valor máximo para as necessidades nominais anuais de energia útil para aquecimento

Relativamente ao valor máximo admitido, pelo regulamento nacional, para as necessidades anuais de energia útil para aquecimento depende da morfologia da unidade habitacional e da zona climática. Assim sendo, os valores limite das necessidades nominais de energia útil para aquecimento, N_i , de uma fração autónoma, em kWh/m².ano, dependem dos valores do fator de forma, FF, da fração autónoma e dos graus-dias do clima em seu redor, e podem ser definidos do seguinte modo:

$$\begin{aligned} N_i &= 4,5 + 0,0395 \text{ GD} && \text{para } FF \leq 0,5 \\ N_i &= 4,5 + (0,021 + 0,037 \text{ FF}) \text{ GD} && \text{para } 0,5 < FF \leq 1 \\ N_i &= [4,5 + (0,021 + 0,037 \text{ FF}) \text{ GD}] (1,2 - 0,2 \text{ FF}) && \text{para } 1 < FF \leq 1,5 \quad (4.12a) \\ N_i &= 4,05 + 0,06885 \text{ GD} && \text{para } FF > 1,5 \end{aligned}$$

Em que o FF é traduzido por fator de forma e é o quociente entre a soma da área da envolvente exterior com o produto da(s) área(s) da(s) envolvente(s) interior(es) pelo(s) respetivo(s) coeficiente(s) τ , a dividir pelo volume interior da unidade habitacional, e é calculado conforme a seguinte expressão:

$$FF = [A_{ext} + \sum(\tau A_{int})] / V \quad (4.12b)$$

Armazenamento sazonal de energia e aplicação do método num caso real

5

Numa primeira instância é apresentado um breve estado de arte do armazenamento sazonal de energia, apresentando alguns exemplos reais, destacando as informações acerca da área de coletores instalados, do volume de armazenamento, da necessidade de aquecimento e do custo do sistema.

Neste capítulo são aplicados todos os métodos apresentados anteriormente, destinados a um dimensionamento de armazenamento sazonal de energia para climatização de um edifício real em Évora. O edifício em questão é um projeto por parte da Universidade de Évora, destinado a residentes universitários, com a finalidade de tornar o edifício altamente sustentável e economicamente viável ao longo dos anos.

Inicialmente é apresentado o local e a planta do edifício em questão, com todas as informações relevantes. É feito um cálculo minucioso das necessidades nominais anuais de energia útil para aquecimento. Como o objetivo é ser um edifício sustentável e acompanhado de sistemas solares de custo aceitável, tentou-se, sempre que possível, diminuir as necessidades anuais de energia para aquecimento. Para tal, as propostas de isolamentos térmicos no edifício, e a espessura adequada, é da responsabilidade do autor desta dissertação.

Uma vez calculado o valor das necessidades nominais anuais de energia útil para aquecimento, é essencial calcular a área de coletores e o volume de armazenamento que sejam capazes de satisfazer as necessidades do edifício. Para tal, são usados dois métodos de cálculo, um com valores médios mensais e outro com valores horários de radiação. Com o auxílio do programa *Matlab* é possível simular o sistema, apresentar graficamente e comparar os resultados obtidos dos dois métodos estudados.

5.1 Armazenamento sazonal de energia solar térmica para aquecimento de edifícios

O armazenamento sazonal de energia solar térmica para aquecimento de espaços começou a ser investigado na Europa nos meados da década de 70 no âmbito de projetos de aquecimento solar em grande escala. Os sistemas em larga escala foram construídos na Alemanha, Suécia, Dinamarca, Áustria e Países Baixos. A primeira planta de demonstração foi desenvolvida na Suécia em 1978/1979, baseado nos resultados do programa nacional de investigação. Alguns estudos foram feitos e revelaram que os custos do armazenamento sazonal de energia solar térmica são elevados e muitos esforços devem ser feitos para alcançar a viabilidade técnica e económica. Portanto, continuam a ser feitas investigações sobre tecnologias e custos para melhorar e otimizar as instalações, com o fim de tornar este conceito mais económico [24].

5.1.1 Armazenamento sazonal em tanques de água

O conceito de armazenamento sazonal de energia em tanques com água foi testado, por exemplo, em Rottweil, para aquecimento de uma pequena loja. O tanque cilíndrico de aço inoxidável foi enterrado e isolado no topo e de lado, de forma a reduzir as perdas térmicas. O objetivo do projeto foi demonstrar a fiabilidade da tecnologia e ganhar experiência para aplicar em plantas de maior escala. Durante 1995/1997 duas grandes aplicações deste género foram construídas em Hamburgo e em Friedrichshafen, com 4500 m³ e 12000 m³ de volume de armazenamento, respetivamente. As aplicações funcionam sem qualquer problema técnico, contudo, elas não satisfazem a relação custo-eficácia devido ao elevado custo de construção [24].

Novos projetos de demonstração para aquecimento urbano assistido com armazenamento sazonal de energia foram desenvolvidos em programas de investigação e desenvolvimento, com avanços ao nível da estratificação e isolamento térmico no tanque de água, projetado para um edifício em Munique. O custo de investimento desta construção está prevista para ser significativamente inferior comparativamente com os projetos anteriores [24].

Outros projetos de demonstração em larga escala foram aplicados na Suécia na década de 80. Em 1979 duas aplicações deste género entraram em funcionamento, em Ingelstad e em Lambohov. Em Ingelstad, o armazenamento sazonal de energia era suportado por um tanque

de armazenamento com 5000 m³ construído no chão e com isolamento térmico. Os resultados mostram a baixa eficiência dos coletores e as elevadas perdas térmicas do tanque de armazenamento. O armazenamento sazonal de energia em Lambohov foi realizado num poço escavado em rochas e isolado com betão leve com argila. O desempenho revelou boa concordância com as previsões, exceto as elevadas perdas térmicas causadas pelo isolamento húmido, que não foram tomadas em consideração nos estudos prévios [24].

Na tabela 5.1 podemos consultar os projetos em larga escala referidos anteriormente com algumas especificações, tais como, a necessidade de aquecimento, a área de coletores instalados, o volume de armazenamento e o custo do sistema.

A partir de [25] é possível consultar todos os projetos em larga escala situados na Europa, com capacidade nominal superior a 700 kW_{th}, e com diferentes métodos de armazenamento sazonal de energia solar térmica.

Tabela 5.1 – Dados técnicos de armazenamento sazonal em algumas cidades europeias [24].

CSHPSS with storage type	Heated living area	Total heat demand, GJ/a	Solar collector area, m ²	Storage volume, m ³	Solar fraction, %	Maximum design storage temperature, °C	Solar heat cost at analysis date, MWh ⁻¹
<i>Water tank</i>							
Hamburg, DE	14800 m ²	5796	3000	4500	49*	95	256 EUR
Friedrichshafen, DE	39500 m ²	14782	5600	12000	47*	95	158 EUR
Hannover, DE	7365 m ²	2498	1350	2750	39*	95	414 EUR
Munich, DE	300 apt.	8280	2900	5700	47*	95	240 EUR
Ingelstad, SE	52 houses		1320	5000	14		1900 SEK
Lambohov, SE	55 houses		2700	10000	37		1100 SEK
Hoerby, DK				500			
Herlev, DK		4520	1025	3000	35		

5.1.2 Razão da escolha desta solução de armazenamento de energia solar térmica

Como é de conhecimento geral é nos meses de verão que se dispõe da maior quantidade de energia solar, e no inverno é quando se recebe a menor quantidade de energia, no hemisfério norte. Quanto à necessidade de aquecimento de espaços a situação inverte-se, isto é, no inverno é quando existe a maior necessidade de aquecimento e no verão, no caso geral, não temos a necessidade de aquecimento. Logo, estas duas variáveis não estão em fase, como se pode verificar através da figura 5.1, existindo a necessidade de se arranjar uma solução inteligente que consiga aproveitar a radiação em excesso e usá-la quando, realmente faz falta. Solução esta, consiste em armazenar a energia solar térmica durante todo o ano e usá-la, apenas, nos meses

de inverno para o aquecimento de espaços. Na figura 5.1, as áreas intersectadas correspondem à energia solar útil, e o objetivo do armazenamento sazonal é aumentar o quanto possível esta área de interseção. Este conceito é eficaz e viável, desde que seja usada a tecnologia adequada e o isolamento térmico aplicado corretamente.

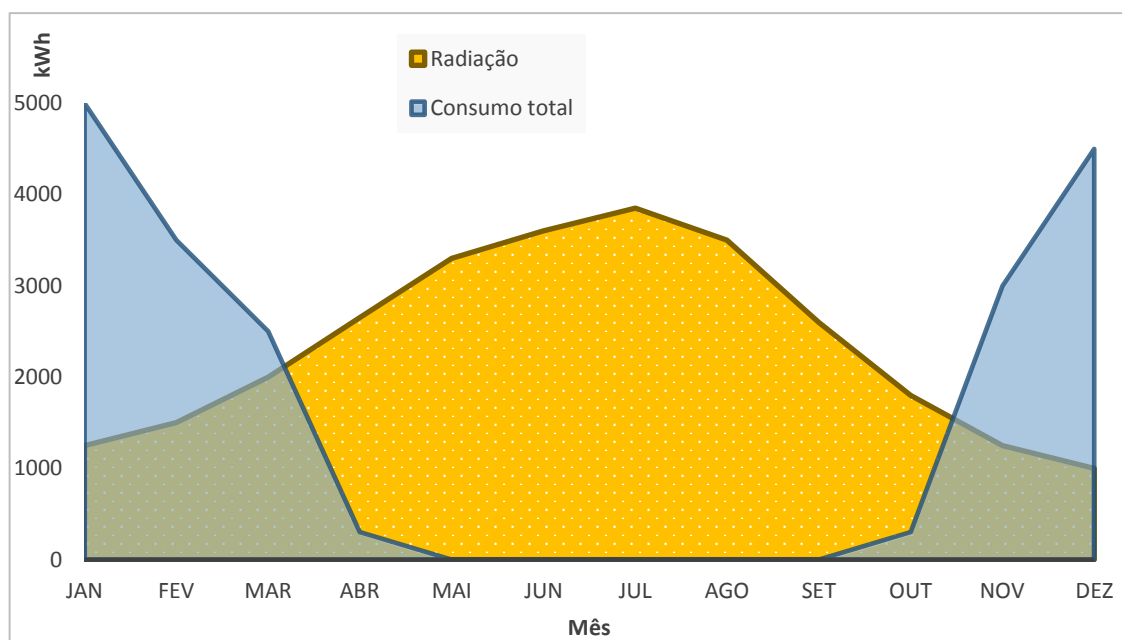


Figura 5.1 – Distribuição anual da energia disponível e das necessidades de aquecimento.

5.2 Aplicação do conceito num caso real em Portugal, Évora

Nesta subsecção será analisado o comportamento térmico de uma unidade habitacional em Évora, com o nome Residência Alcaçarias, destinado para residentes universitários. O objetivo da análise passa pela verificação regulamentar nacional ao nível das necessidades nominais de aquecimento (N_{ic}). São feitas propostas relativamente ao isolamento térmico a ser aplicado e a espessura do mesmo, de modo a diminuir as necessidades de aquecimento do edifício. As necessidades nominais de arrefecimento são desprezadas para este estudo, visto tratar-se de uma residência universitária, significando que nos meses de calor mais extremo encontra-se encerrada.

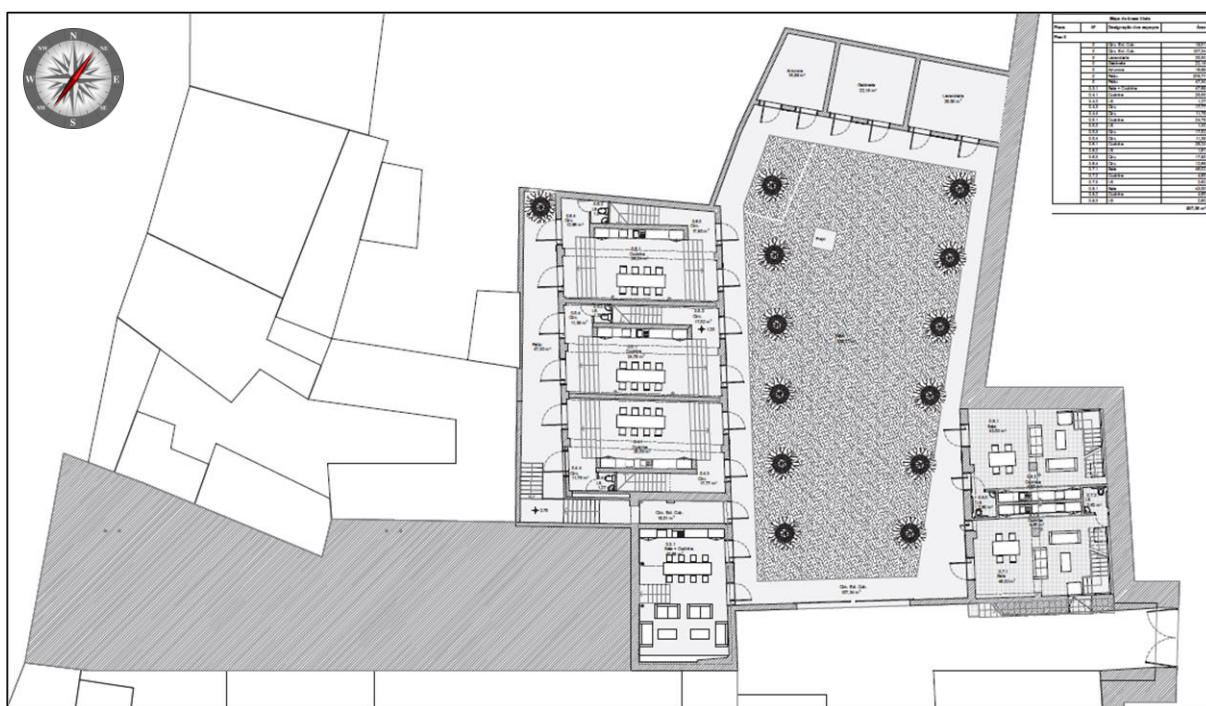
Numa segunda fase, serão feitas duas simulações computacionais, uma com base em dados médios mensais e outra com dados horários de radiação, de modo a dimensionar o sistema

necessário para compensar as perdas térmicas do edifício. Assim sendo, é necessário ter conhecimento acerca da área de coletores a ser instalada e do volume de armazenamento que seja capaz de satisfazer as necessidades de aquecimento calculadas anteriormente.

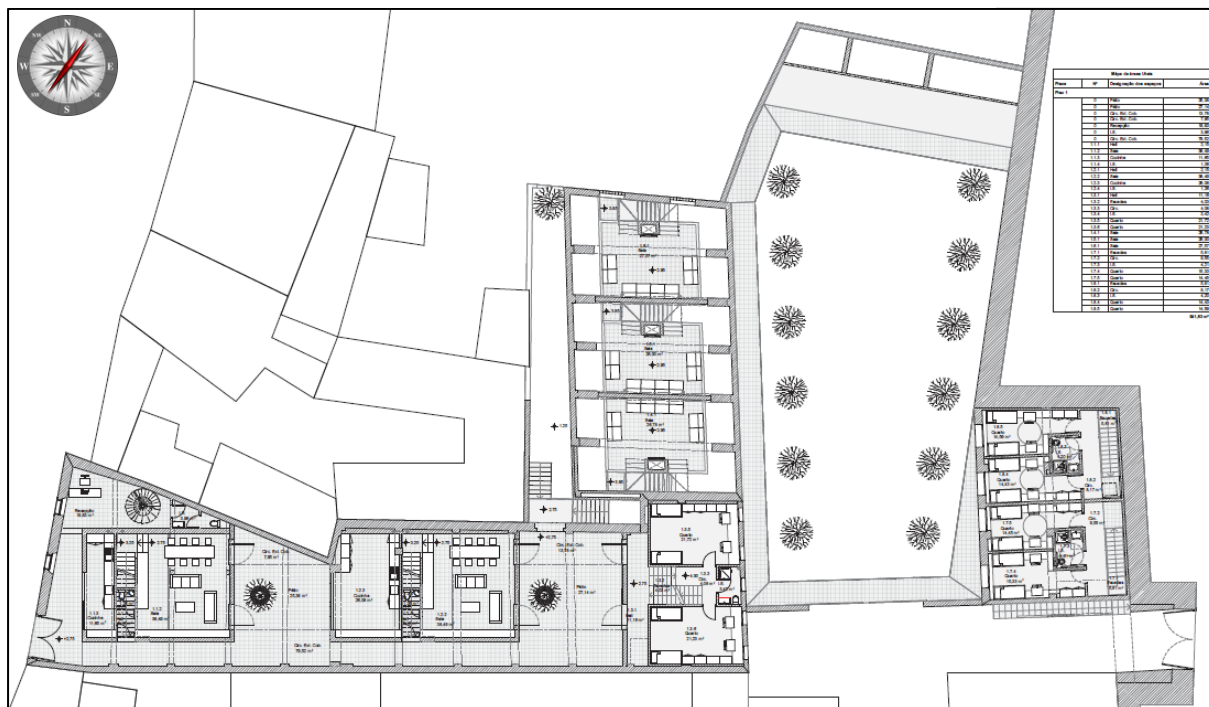
5.2.1 Estrutura arquitetónica do edifício

A estrutura arquitetónica analisada consiste numa residência universitária destinada a 56 ocupantes, localizada na cidade de Évora. A estrutura do edifício não é toda uniforme, podendo ser dividida em 5 frações, em que uma fração é composta por 4 pisos, outra por 3 e as restantes frações são compostas por 2 pisos. Para as necessidades energéticas são tomadas em conta todas as zonas comuns e todos os quartos, desprezando apenas as zonas de acesso. As figuras 5.2 a), b), c), d) e e) correspondem às plantas do piso 0, piso 1, piso 2, piso 3 e vista aérea, respetivamente, projetadas pelo arquiteto Nuno Ramos da Universidade de Évora. Os cortes e perspetivas da estrutura podem ser consultados no Anexo 5 - a).

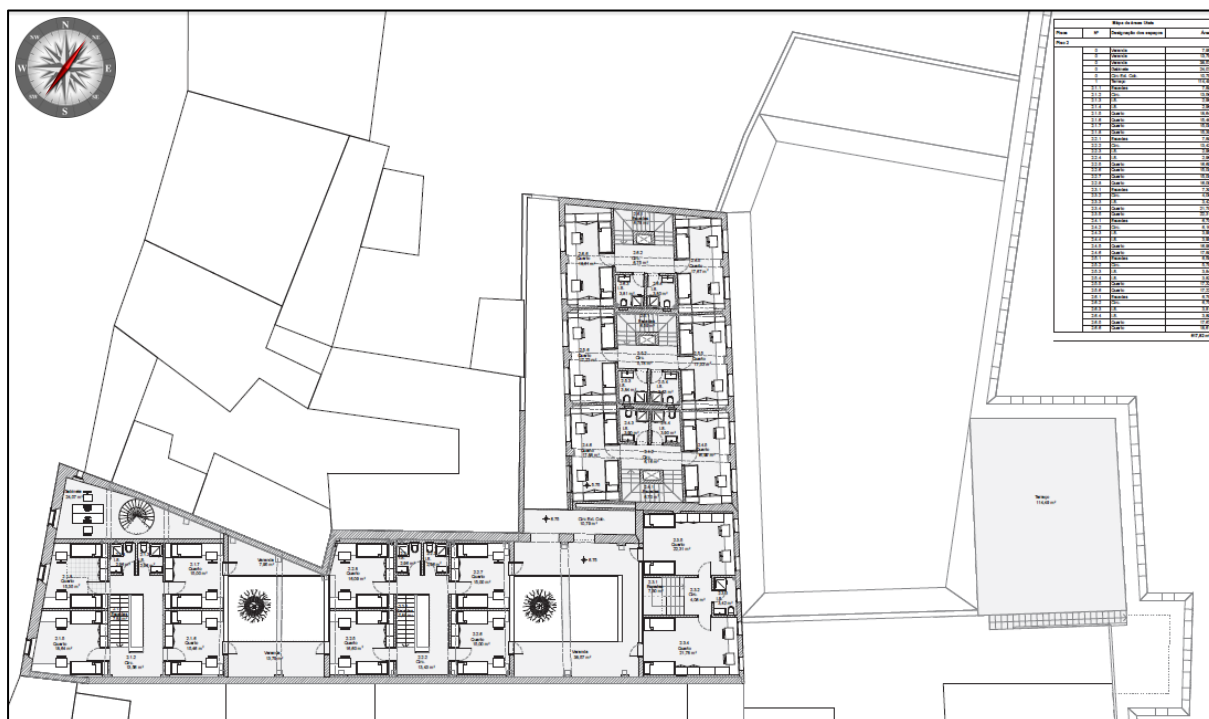
(a)



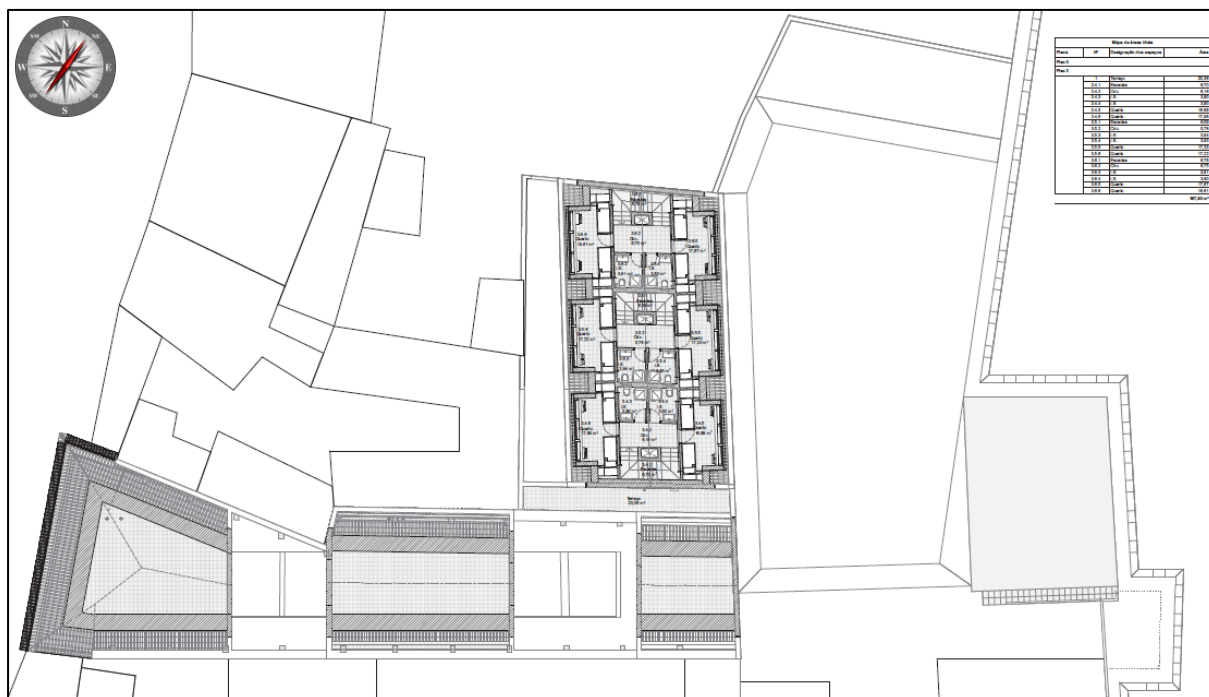
(b)



(c)



(d)



(e)

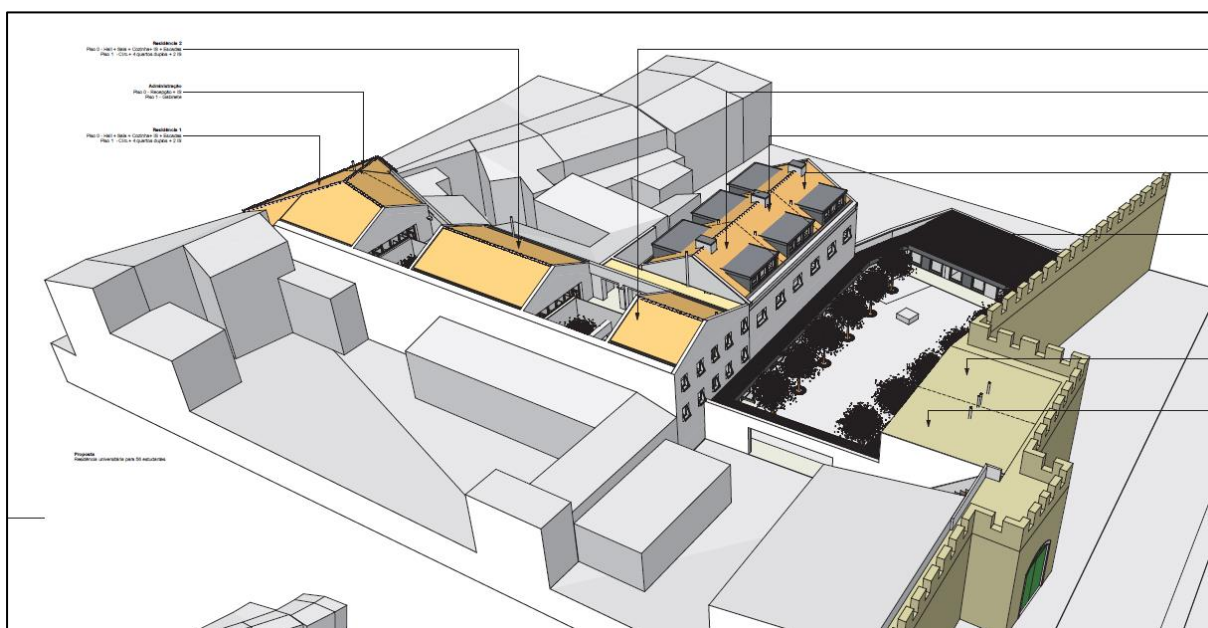


Figura 5.2 – Plantas do Projeto da Residência Alcaçarias. (a) Piso 0. (b) Piso 1. (c) Piso 2. (d) Piso 3. (e) Vista aérea.

Daqui para a frente o edifício será dividido em 5 frações, numeradas de 1 a 5 (da esquerda para a direita), de modo a facilitar a leitura da planta. A fração situada mais a Norte não será contabilizada neste estudo, visto tratar-se de zonas técnicas e lavandarias, sem qualquer

necessidade de aquecimento. A área útil e o pé direito médio de cada andar e de cada fração do edifício estão sintetizados na tabela 5.2, o que resulta uma área útil total de pavimento de 1459,35 m² e um volume interior de 4120 m³.

Tabela 5.2 – Área útil e pé direito médio de cada fração do edifício.

Piso	Área útil [m ²]				Pé direito médio [m]			
	0	1	2	3	0	1	2	3
Fração 1	—	59,15	138	—	—	3,8	3,8	—
Fração 2	—	75,24	94,62	—	—	3,8	4,2	—
Fração 3	47,6	61,61	61,61	—	2,55	2,55	2,4	—
Fração 4	182	182	182	182	2,4	2,55	2,4	2,4
Fração 5	96,76	96,76	—	—	2,48	2,55	—	—

No Anexo 5 – b), encontram-se para consulta os dados técnicos referentes às coberturas exteriores e às paredes exteriores, medidos sempre pelo interior.

No Anexo 5 – c), encontram-se para consulta todas as tabelas referentes ao cálculo do coeficiente de transmissão térmica (U) das coberturas e das paredes exteriores. O isolamento proposto será de Poliestireno Expandido Moldado com uma espessura de 0,10 m para as coberturas e de 0,10 m para as paredes exteriores. Quando se refere às paredes exteriores, os vidros e as portas não são contabilizadas nesta secção. Os vãos envidraçados requerem uma contabilização específica, como poderá ser confirmado mais adiante.

5.2.2 Perdas térmicas totais do edifício

5.2.2.1 Perdas térmicas associadas à envolvente exterior

Nesta secção são apresentados todos os resultados referentes às perdas térmicas associadas à envolvente exterior da unidade habitacional. São elas as paredes exteriores, as coberturas exteriores, os pavimentos em contato com o solo e as pontes térmicas lineares. No Anexo 5 – b) são apresentadas as áreas da cobertura e das paredes exteriores, no Anexo 5 – c) são apresentados os coeficientes de transmissão térmica (U) e no Anexo 2 são apresentados os dados referentes aos coeficientes de transmissão térmica linear (Ψ). Assim sendo, todos os dados necessários para o cálculo das perdas térmicas associadas à envolvente exterior são apresentados e os resultados podem ser consultados nas tabelas seguintes:

Tabela 5.3 – Perdas associadas à envolvente exterior. (a) Paredes exteriores. (b) Coberturas exteriores. (c) Pavimentos em contacto com o solo. (d) Pontes térmicas lineares.

(a)

Paredes Exteriores	Área	U	U.A
Alçada Sul	231,45	0,27	63,36
Alçada Norte	96,32	0,27	26,37
Alçada Este	282,78	0,27	77,41
Alçada Oeste	252,64	0,27	69,16
Total	863,19		236,29

(b)

Coberturas Exteriores	Área	U	U.A
Fração 1 e 2	202,62	0,33	66,55
Fração 3, 4 e 5	336,18	0,34	115,00
Total	538,8		181,55

(c)

Pavimentos em contato com o Solo	Perímetro B (m)	Ψ (W/m°C)	$\Psi.B$ (W°C)
Fração 1	31	0,5	15,5
Fração 2	34,6	0,5	17,3
Fração 3	26,6	0,5	13,3
Fração 4	55,5	0,5	27,75
Fração 5	38,7	0,5	19,35
Total			93,2

(d)

Pontes Térmicas lineares			
Ligação entre:	Comprimento	Ψ	$\Psi.B$
Fachada com os Pavimentos térreos	188,9	0,55	103,90
Fachada com Pavimentos intermédios	290,5	0,1	29,05
Fachada com Cobertura inclinada ou Terraço	198,1	0,45	89,15
Dois Paredes verticais	157,6	0,15	23,64
Total			245,73

Fazendo o somatório de todas as parcelas, conclui-se que as perdas térmicas pela envolvente exterior do edifício tomam o valor correspondente a 756,77 W/°C.

5.2.2.2 Perdas térmicas associadas à envolvente interior

Nesta secção são apresentados os resultados obtidos relativamente às perdas térmicas associadas à envolvente interior. No edifício analisado, na envolvente interior apenas se verificam perdas através das paredes em contacto com edifícios adjacentes, e conclui-se que o valor das perdas toma o valor de 23,30 W/°C, como pode ser visível na tabela 5.4.

Tabela 5.4 – Perdas associadas à envolvente interior.

Paredes em contacto com edifícios adjacentes	Área (m ²)	U (W/m ² °C)	τ	U.A.τ (W/°C)
Fração 1	85,5	0,27	0,6	14,04
Fração 2	41,8	0,27	0,6	6,87
Fração 3	14,5	0,27	0,6	2,39
Total	141,8			23,30

5.2.2.3 Perdas térmicas associadas aos vãos envidraçados exteriores

Os vãos envidraçados exteriores detêm um papel relevante no ponto de vista das perdas térmicas de um edifício na estação de aquecimento. Portanto, é essencial a escolha adequada das características e da orientação dos envidraçados. A colocação de palas horizontais com um certo comprimento é uma boa solução, para que faça sombreamento no verão e deixe passar a luz solar no inverno.

Considerando que todos os envidraçados apresentam as mesmas características, compostos por vidro duplo de espessura da lâmina de ar igual a 16 milímetros e dispositivo de oclusão noturna com baixa permeabilidade ao ar, e com caixilharia de plástico ou madeira ($U = 2 \text{ W/m}^2\text{°C}$) [22], o valor associado às perdas pelos vãos envidraçados exteriores é igual a 448,5 W/°C, tal como pode ser visto na tabela seguinte:

Tabela 5.5 – Perdas associadas aos vão envidraçados exteriores.

Vãos Envidraçados Exteriores	Área	U	U.A
Verticais	(m ²)	(W/m ² °C)	(W/°C)
Sul	8,8	2	17,5
Norte	4,7	2	9,5
Este	96,3	2	192,7
Oeste	114,4	2	228,9
Total	224,3		448,5

5.2.2.4 Perdas térmicas associadas à renovação de ar

Como já foi dito, por razões de higiene e conforto dos ocupantes, é necessário que os edifícios sejam ventilados em permanência por um caudal mínimo de ar, em que a taxa de renovação mínima necessária é igual a 0,6 renovações por hora. Contudo, isto implica perdas térmicas adicionais ao edifício. No cálculo de Q_v , considera-se que a classe de caixilharia das janelas é de classe 3, sem caixa de estore. A classe de exposição ao vento das fachadas do edifício é de classe 1, com dispositivos de admissão de ar, o que resulta o $R_{ph} = 0,65$.

Assim sendo, para o volume interior do edifício de 4120 m³ e uma taxa de renovação nominal de 0,65, as perdas térmicas derivadas da renovação do ar correspondem a 910,53 W/°C, e o método de cálculo pode ser consultado no Anexo 5 – d).

5.2.3 Ganhos úteis na estação de aquecimento

Os ganhos térmicos de uma unidade habitacional devem-se devido a dois fatores – ganhos térmicos associados a fontes internas de calor, Q_i , e ganhos térmicos associados ao aproveitamento da radiação solar, Q_s . Com exclusão do sistema de aquecimento, os ganhos térmicos internos incluem qualquer fonte de calor situada no espaço a aquecer, nomeadamente, os ganhos de calor associados ao metabolismo dos ocupantes, e o calor dissipado nos equipamentos e nos dispositivos de iluminação [21].

Para um edifício residencial, a partir da tabela 4.7, o valor dos ganhos térmicos internos médios por unidade de superfície é igual a 4 W/m², e para uma área interior útil de pavimento do edifício

igual a 1459,4 m², chega-se ao resultado dos ganhos internos brutos, sendo igual a 23956,7 kWh/ano.

Para o cálculo dos ganhos solares brutos, este depende principalmente da área dos envidraçados, da orientação dos mesmos e da existência de sombreamento ou não. A metodologia de cálculo encontra-se expressa na subsecção 4.3.3.2 e o resultado obtido dos ganhos solares brutos é de 19728,56 kWh/ano.

A relação γ , expressa na equação 4.11b, apresenta um valor igual a 0,61. Sabendo γ , recorre-se à expressão 4.11a para calcular o fator de utilização dos ganhos térmicos (η), apresentando um valor igual a 0,95.

Por fim, o valor correspondente aos ganhos totais úteis na estação de aquecimento (Q_{gu}) é obtido através da expressão 4.9b, correspondendo a 41345,9 kWh/ano.

Todos os cálculos efetuados e os resultados obtidos são apresentados com mais detalhe no Anexo 5 – e).

5.2.4 Necessidades nominais de aquecimento e o seu valor máximo

Para o cálculo das necessidades nominais de aquecimento máximo (N_i) é necessário, primeiro, recorrer à expressão 4.12b para calcular o fator de forma do edifício, tendo chegado ao resultado igual a 0,43. Com o valor do fator de forma conhecido e através da expressão 4.12a é possível calcular o valor máximo admissível das necessidades nominais de aquecimento, tendo chegado ao resultado de $N_i = 59,4$ kWh/m².ano. Isto significa que as necessidades nominais de aquecimento do edifício estudado não pode ultrapassar este valor calculado analiticamente.

Relativamente às necessidades nominais anuais de aquecimento do edifício (N_{ic}), resulta o valor de 20,6 kWh/m².ano, valor este que está relacionado com o coeficiente global de perdas e dos dados climáticos da zona. O coeficiente global de perdas do edifício resulta das perdas térmicas associadas à envolvente exterior, envolvente interior, vãos envidraçados e renovação do ar, chegando ao valor de 2139,11 W/°C. A partir deste momento, calcula-se as necessidades brutas de aquecimento, 71360,55 kWh/ano, e subtraindo o valor dos ganhos totais úteis, 41345,92 kWh/ano, resulta o valor da necessidade de aquecimento anual, sendo igual a 30014,64 kWh/ano. O quociente entre o valor das necessidades de aquecimento e a área útil do pavimento, resulta o valor das necessidades nominais de aquecimento (N_{ic}), sendo igual a 20,6

kWh/m².ano. Por fim, é possível concluir que os requisitos regulamentares são cumpridos, visto que ($N_{ic} < N_i \rightarrow 20,6 < 59,4$).

O procedimento de cálculo e os resultados obtidos é possível ser consultado no Anexo 5 – f).

Nota: É de salientar que, caso fosse aplicado o método de cálculo do REH, em vez do RCCTE, o valor das necessidades nominais anuais de energia útil para aquecimento seria mais baixo, pois, como já foi dito, os parâmetros são na base de 18°C. Com o valor das necessidades anuais de aquecimento mais baixo, conduziria a que o sistema solar fosse mais pequeno, em cerca, de aproximadamente, 20%.

5.3 Dimensionamento do sistema solar térmico e do volume de armazenamento

Nesta secção será simulado o sistema solar térmico e o volume de armazenamento capazes de satisfazer as necessidades de aquecimento do edifício analisado. O objetivo da simulação é, no dia 1 de Abril do primeiro ano de funcionamento, a temperatura da água no tanque de armazenamento ser igual à temperatura da água da rede e armazenar energia até ao dia 31 de Outubro, dia esse em que a temperatura da água deverá atingir os 95 °C. A partir do dia 1 de Novembro até 31 de Março, a energia será transferida para dentro do espaço a ser aquecido, com ajuda de ventiloconvectores, até atingir no mínimo a temperatura de 30 °C do fluido de armazenamento. A partir do segundo ano, o princípio de funcionamento será sempre o mesmo, com a diferença de que a temperatura inicial será no primeiro dia do ciclo igual a 30 °C em vez de ser igual à temperatura da água da rede. A temperatura de 30 °C foi definida pelo facto de que nesse nível ainda se consegue extrair energia suficiente para o aquecimento, e abaixo dela será mais complicado.

O princípio de funcionamento do ciclo de carga e descarga de energia do depósito é demonstrado na figura 5.3.

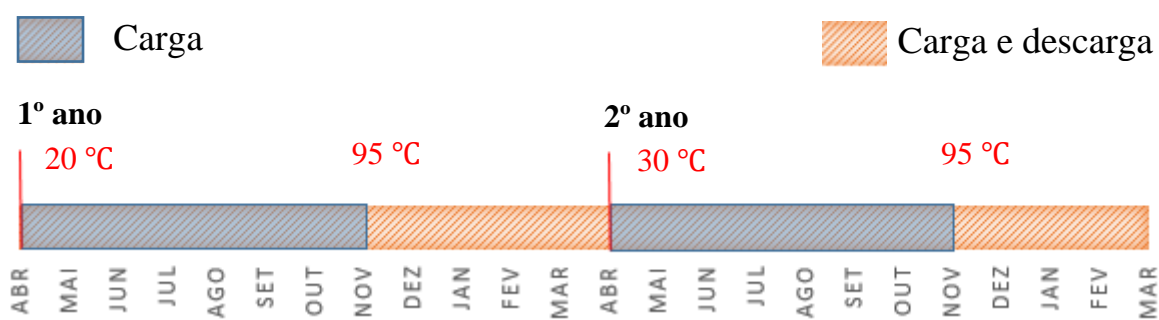


Figura 5.3 – Ciclo de carga e descarga de energia do depósito de armazenamento.

Como já foi referido, serão feitas duas simulações, uma com base em cálculos com valores médios mensais recorrendo a correlações empíricas e outra com base em valores horários de radiação, recorrendo ao *software* Meteonorm. Por fim, será feita uma comparação entre os dois métodos simulados, de modo a verificar o comportamento entre ambos.

5.3.1 Simulação com base em valores médios mensais de radiação

Para esta simulação, foram utilizados todos os conceitos descritos no subcapítulo 3.1. Primeiro, é necessário conhecer os doze valores médios mensais da radiação hemisférica sobre o plano horizontal (H_h) [10], e a partir deles é possível calcular o valor diário médio mensal da radiação incidente (H_{col}). H_{col} é calculado, a partir da expressão 3.4, apenas para o dia médio de cada mês e é constante para os restantes dias. Os valores de H_{col} , para Évora, podem ser consultados a partir da tabela 3.1 ou recorrendo a figura 5.4, expresso em J/m^2 .

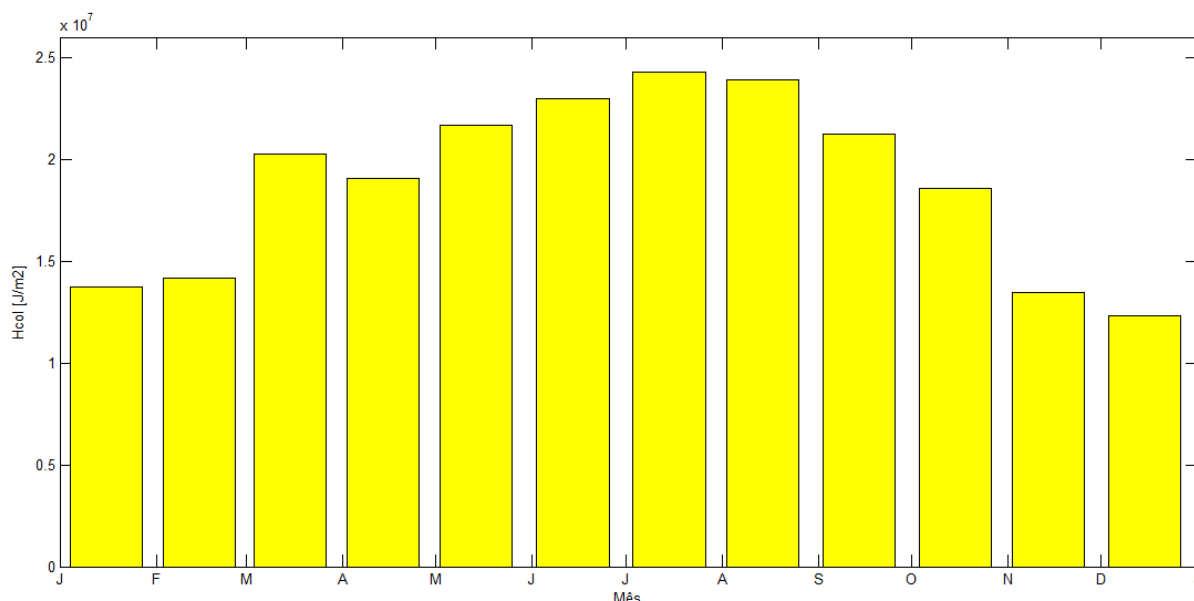


Figura 5.4 – Valores diários médios mensais da radiação incidente no coletor.

Após ser conhecido o valor de H_{col} , é possível calcular a função utilizabilidade (ϕ). Como a utilizabilidade depende da temperatura do fluido (T_{in}), este termo não será constante ao longo do mês. A temperatura do depósito no primeiro dia começa à temperatura da rede ($T_{in} = T_r$) e vai aumentando gradualmente. No segundo dia, a temperatura de entrada nos coletores será a temperatura final do depósito no dia anterior, e assim sucessivamente.

Para uma temperatura inicial do fluido igual a $20^\circ C$ e para o coletor com as seguintes características: $F_R U = 4,825$ e $F_r \eta_o = 0,695$ exatamente virados a sul, e com a inclinação igual à latitude, resulta a figura 5.5 referente ao comportamento do termo utilizabilidade ao longo dos meses do ano. Como este termo é função da temperatura de entrada, ele não é constante ao longo do mês.

Como é visível na figura 5.5, ϕ diminui gradualmente entre os meses de Abril e Novembro à medida que a temperatura do depósito aumenta, e ϕ aumenta entre Novembro e Março, quando é extraída a energia, e a temperatura do depósito diminui. Entre Março e Abril ainda é retirada energia armazenada no depósito, porém os ganhos solares são superiores às perdas e a temperatura do depósito sobe gradualmente, logo ϕ vai diminuindo.

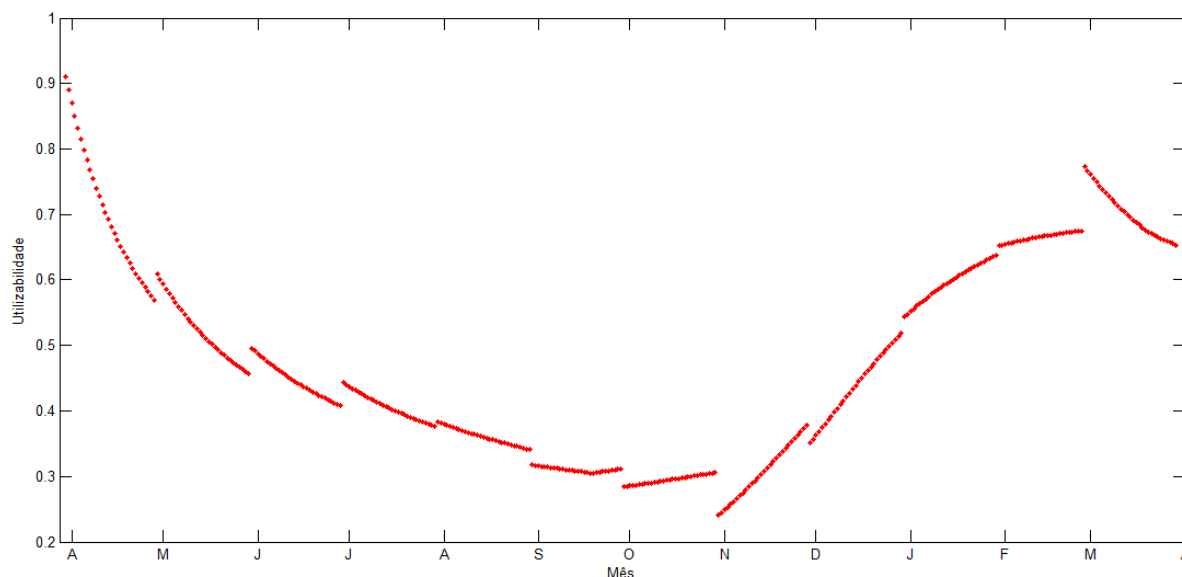


Figura 5.5 – Função utilizabilidade ao longo do ano, a medida que a temperatura do depósito varia.

Depois de conhecidos os valores de H_{col} e ϕ , é possível calcular a energia útil do sistema solar (Q_{mes}), através da expressão 3.1. Como a energia útil depende da temperatura do fluido, o seu perfil será semelhante ao perfil da função utilizabilidade, como pode ser comprovado na figura 5.6.

Quanto menor a temperatura de entrada, maior será a energia útil, e, pelo contrário, quanto maior a temperatura de entrada, menor será a energia extraída, até ser igual a zero quando é atingida a temperatura de estagnação do coletor.

Na figura 5.6 é apresentado Q_{mes} ao longo do ano em função da temperatura de entrada, e expresso em $J/m^2 \cdot dia$.

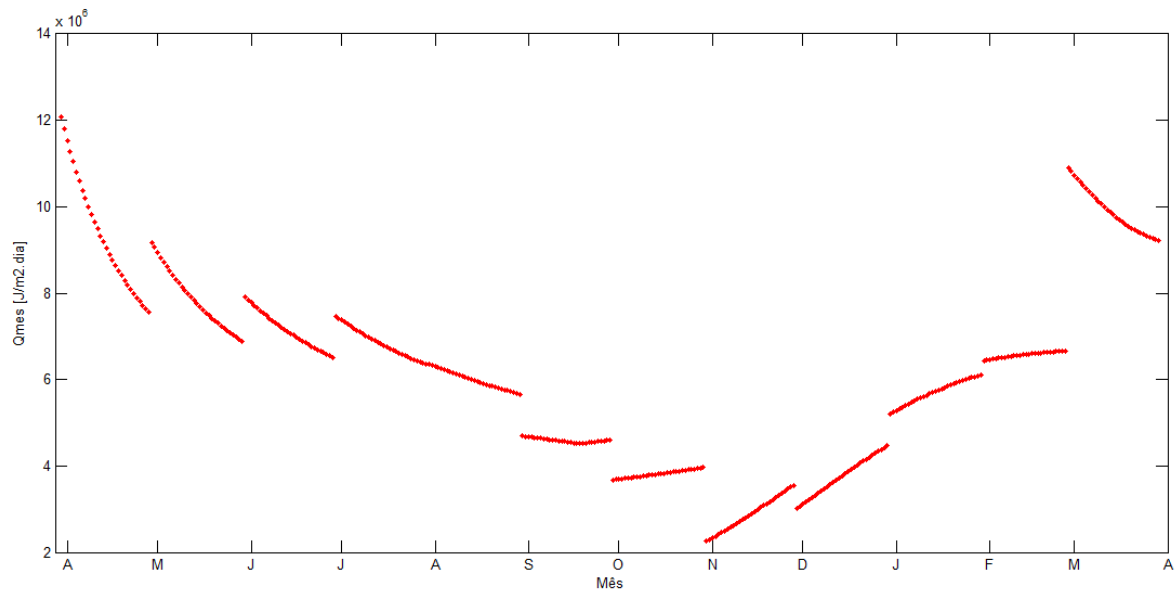


Figura 5.6 – Resultado obtido da energia útil do sistema solar (Q_{mes}) ao longo do ano.

O cálculo da temperatura de armazenamento é realizado de duas maneiras distintas, uma para o período de carga e outra para o período de descarga de energia.

Para o período de carga:

$$Q_{mes} - Q_{perdas dep.} = M C_p (T_o - T_{in}) \quad (5.1a)$$

$$T_o = \frac{Q_{mes} - Q_{perdas dep.}}{M.C_p} + T_{in} \quad (5.1b)$$

E para o período de descarga:

$$Q_{mes} - Q_{perdas dep.} - Nec_{aquecimento} = M C_p (T_o - T_{in}) \quad (5.2a)$$

$$T_o = \frac{Q_{mes} - Q_{perdas dep.} - Nec_{aquecimento}}{M.C_p} + T_{in} \quad (5.2b)$$

em que:

$$Q_{perdas dep.} = A_{dep} U_{dep} (T_{in} - T_{env}) \Delta t = \text{perdas térmicas do depósito,}$$

$$U_{dep} = 0,42 \text{ W/m}^2.\text{°C} = \text{fator de perdas do depósito [26],}$$

M = massa de água.

É criado um ciclo no programa Matlab em que são impostas todas as condições iniciais e as variáveis, bem como os limites máximos e mínimos da temperatura do depósito (95°C e 30°C), chegando-se a conclusão que o sistema adequado para satisfazer todas estas condições seria composto por 116 m² de área de coletores e 220 m³ do volume de armazenamento. Para este cálculo, uma serie de dados tiveram de ser assumidos. O depósito encontra-se enterrado, com uma temperatura da envolvente constante (15°C) ao longo do ano e isolado termicamente com 10 cm de poliestireno expandido moldado (EPS), com um coeficiente de transmissão térmica igual a 0,42 W/m²°C.

Sabe-se que durante toda a estação de aquecimento são necessários 30014,64 kWh para manter a temperatura interior constante a 20°C, o que resulta na seguinte distribuição mensal:

- Necessidade Novembro: 5101,12 kWh;
- Necessidade Dezembro: 6493,13 kWh;
- Necessidade Janeiro: 6737,13 kWh;
- Necessidade Fevereiro: 5776,13 kWh;
- Necessidade Março: 5907,13 kWh.

Para o cálculo anterior, é usada a seguinte expressão:

$$Q_{mensal} = U \cdot A \cdot (T_i - T_{atm}) \quad (5.3)$$

em que

A = área total interior a ser aquecida,

T_i = temperatura interior de referência (20°C),

T_{atm} = temperatura média mensal exterior.

Portanto, para um sistema composto por 116 m² de coletores com as seguintes características: $F_R \eta_o = 0,695$ e $F_R U = 4,825$ W/m².°C, acoplado a um depósito com 220 m³, a variação da temperatura e os seus limites máximos e mínimos ao longo de um ano podem ser observados na figura 5.7.

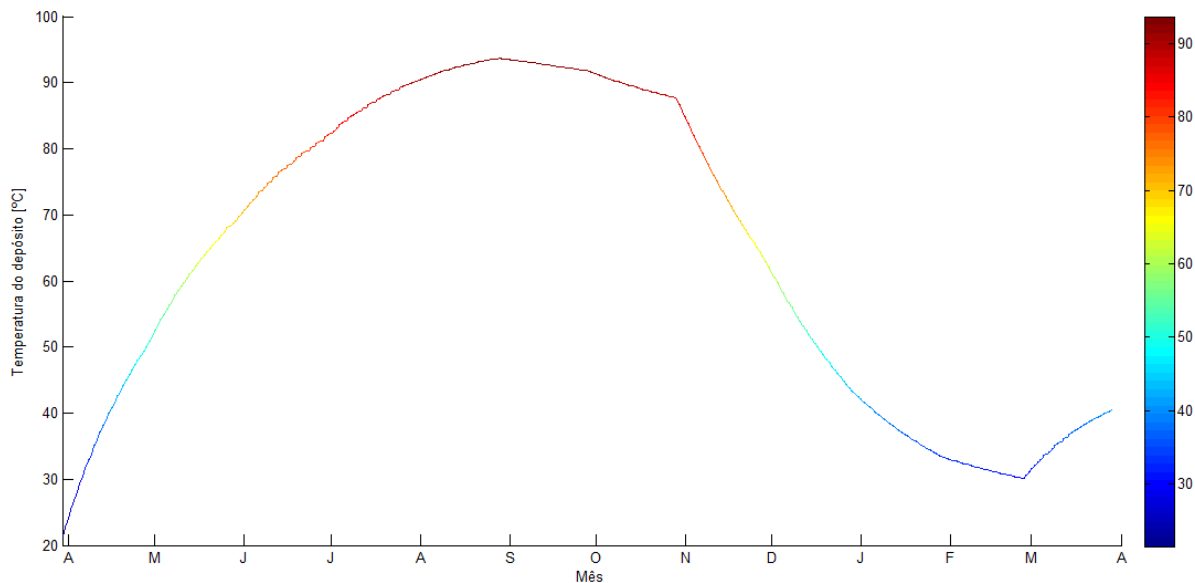


Figura 5.7 – Variação da temperatura da água no depósito de armazenamento ao longo do ano.

Fazendo uma breve análise à figura 5.7 podemos concluir desde logo que a simulação respeita os limites de temperatura impostos, em que a temperatura máxima atingida no depósito é de 93,7°C, entre Setembro e Outubro, e 30,2°C no início de Março. Entre Setembro e Outubro verifica-se que a temperatura não aumenta, acontecendo devido ao facto de a temperatura no depósito ser muito elevada levando a que as perdas térmicas através do depósito sejam igualmente elevadas. Em contrapartida, entre Março e Abril, ainda é retirada energia do depósito e mesmo assim regista-se um aumento da temperatura do depósito, acontecendo devido a que os ganhos são superiores às perdas.

Relativamente às perdas térmicas do depósito, este seguirá um perfil semelhante à temperatura do mesmo, já que depende principalmente da temperatura, do fator de perdas e da área lateral. A área do depósito está relacionada com o seu volume e é calculada através da seguinte expressão:

$$A_{dep} = 9 \pi \left(\frac{V_{dep}}{3,5\pi} \right)^{2/3} \quad (5.4)$$

O fator de perdas (U) utilizado é de 0,42 W/m².°C, valor este que pode ser reduzido com o aumento da espessura de isolamento térmico. Considerou-se que o depósito seria parcialmente enterrado, com uma temperatura da envolvente constante ao longo do ano, $T_{env} = 15^{\circ}\text{C}$. Por fim, as perdas térmicas do depósito, em Joule, com a variação da temperatura, podem ser examinadas na figura 5.8.

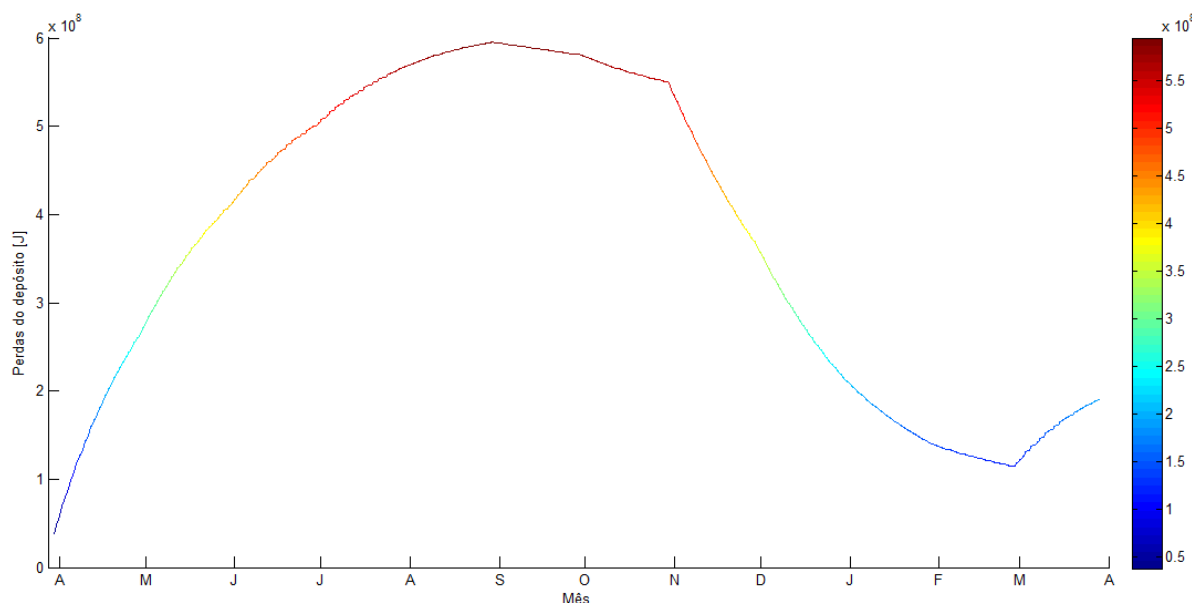


Figura 5.8 – Perdas térmicas do depósito ao longo do ano.

Por último, foi feita uma simulação para cinco anos do comportamento da temperatura do depósito, de forma a observar qual o máximo e o mínimo que a temperatura atingirá. Este tópico é importante de analisar, pois a temperatura não deverá ser superior a 95°C, pois acima dela a água estará prestes a atingir o ponto de ebulição. Como se pode ver na figura 5.9, no primeiro ano a temperatura máxima atingida é de 93,7°C e a mínima de 30,2°C. A partir do segundo ano em diante, a temperatura máxima será 94,2°C e o mínimo 30,2°C.

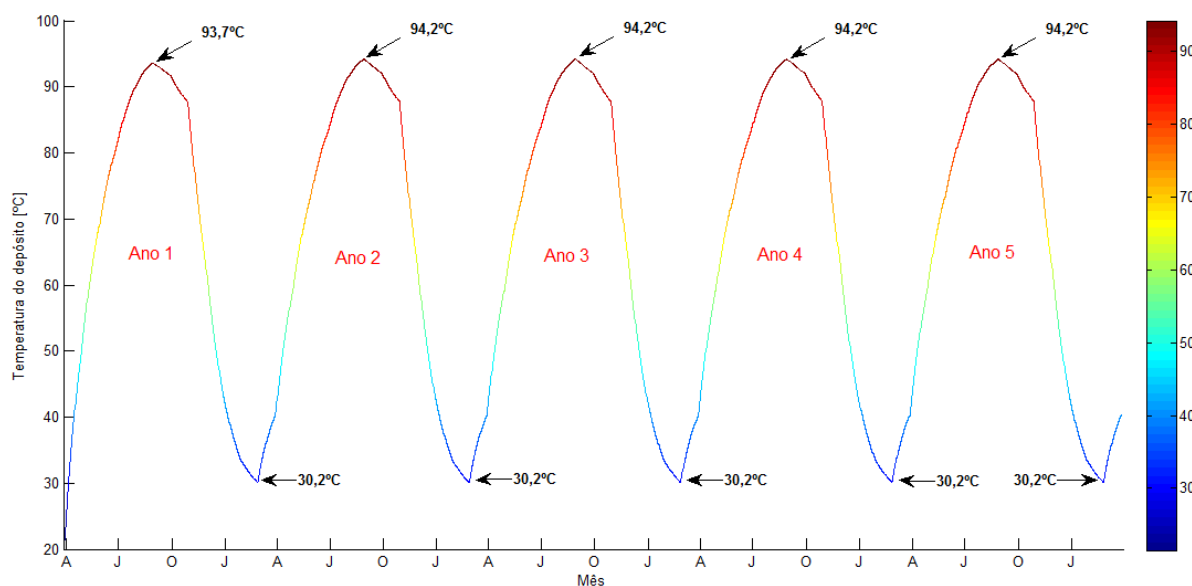


Figura 5.9 – Simulação da temperatura da água no depósito para um ciclo de 5 anos.

5.3.2 Simulação com base em valores horários de radiação

Nesta simulação são usados todos os conceitos descritos no subcapítulo 3.2. Os dados de radiação direta, global e difusa, bem como os valores horários da temperatura ambiente são gerados a partir do software Meteonorm.

Primeiro é necessário conhecer o ângulo de incidência dos raios solares na superfície do coletor em cada hora, e de seguida, qual a transmissividade correspondente a esse ângulo, através da expressão 3.18. Por fim, através da expressão 3.17, é necessário calcular a temperatura de entrada do fluido em cada hora e, se a condição + é satisfeita, calcular o calor útil.

Depois de ter sido feito o ciclo, é possível simular o sistema solar. Neste caso, tal como no caso anterior, simulou-se um sistema com 116 m² de coletores e 220 m³ de volume de armazenamento. Como esta simulação é feita com valores horários, é de esperar, desde logo, que se verifique maiores oscilações quer na energia útil, quer na temperatura do fluído, e, por consequente, nas perdas térmicas do depósito. Na figura 5.10 é possível observar o comportamento da temperatura da água no depósito ao longo de um ano.

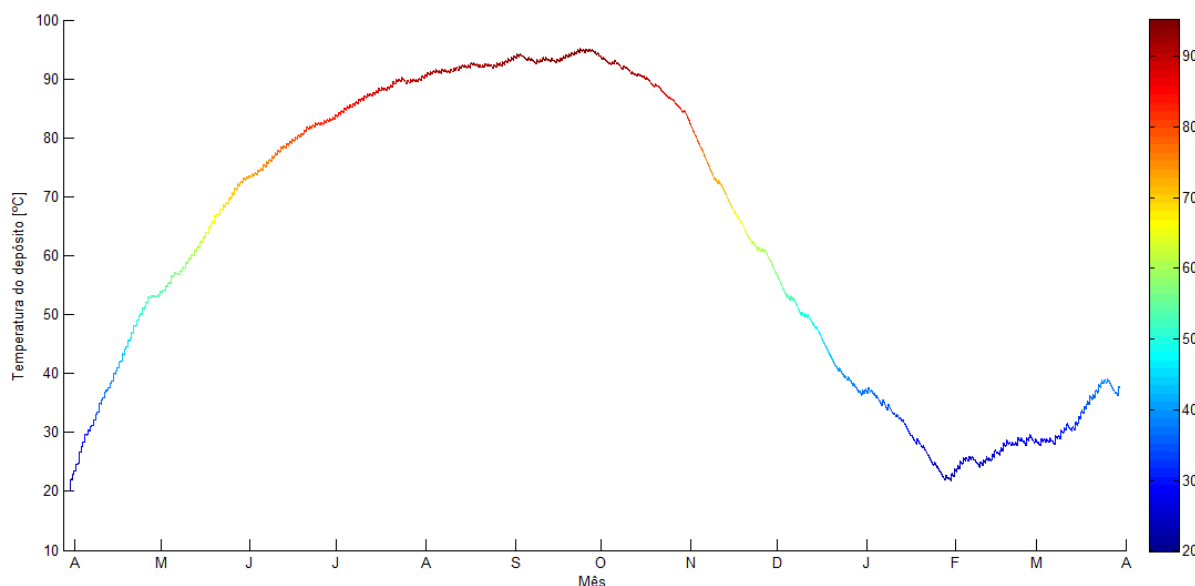


Figura 5.10 – Simulação da temperatura no depósito com base em valores horários de radiação.

Tal como previsto, nesta simulação verificam-se maiores oscilações comparativamente ao primeiro caso, e para ser feito uma comparação mais detalhada surge a figura 5.11, em que são sobrepostas as duas simulações em simultâneo.

As duas simulações respeitam o limite máximo definido para a temperatura do depósito (95°C), contudo o limite mínimo não é respeitado pela simulação com valores horários de radiação, chegando a atingir a temperatura mínima no final de Janeiro na ordem dos 23°C.

As duas simulações iniciam o ciclo, com as mesmas condições, no dia 1 de Abril e é feito o carregamento de energia até 31 de Outubro. Nesse período, o comportamento da curva da temperatura no depósito é muito semelhante nos dois casos. Contudo no período de descarga de energia, entre 1 de Novembro e 31 de Março, na simulação com valores horários a descida de temperatura é mais acentuada, chegando a atingir 23°C no fim de Janeiro. Uma das razões pode ser devido ao facto da amplitude térmica ser grande, e quando a temperatura ambiente é mais baixa que a média, ocorrem maiores perdas. Outro fator a ter em consideração é a existência de dias nublados. Isto é, dos dados de radiação analisados, existem dias com níveis de radiação muito baixos, dias esses em que a condição + não é satisfeita, e as perdas são superiores aos ganhos, logo nesses dias a temperatura do depósito apenas desce.

Por fim, a temperatura da água no depósito no fim de Março voltam a estar praticamente no mesmo nível nos dois casos.

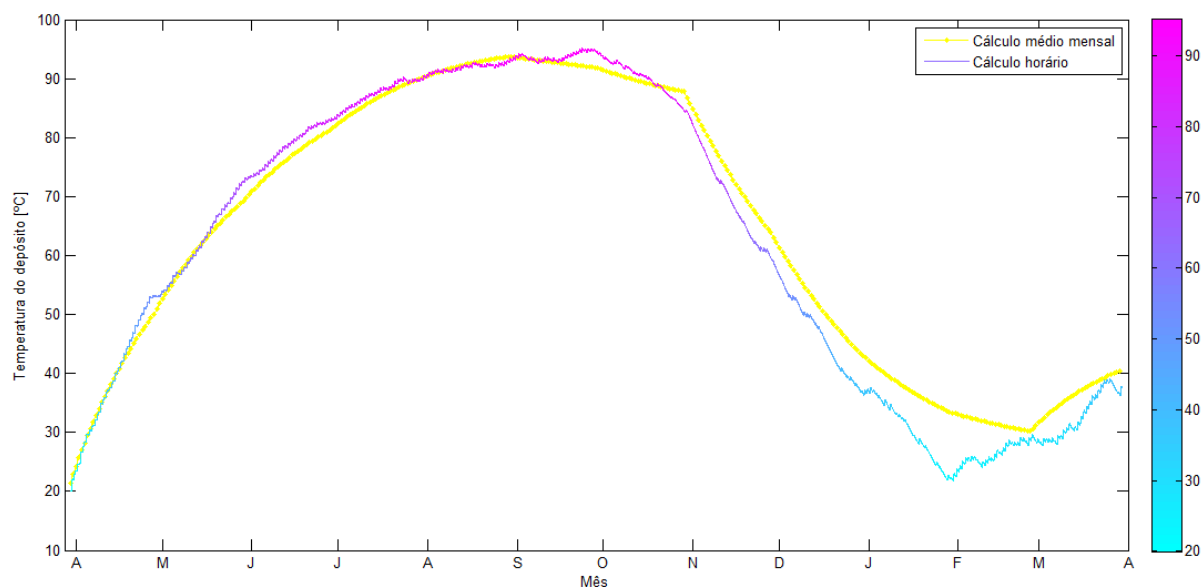


Figura 5.11 – Temperatura da água no depósito ao longo do ano. Comparação entre a simulação com valores médios mensais de radiação e com valores horários de radiação.

5.4 Análise económica

5.4.1 Estimativas de investimento

Em todos os projetos é essencial ser feita uma análise económica antecipada, de forma a prever a rentabilidade do mesmo. Para tal, é essencial ser feita uma estimativa de investimento e o quanto mais próximo da realidade possível. Durante este estudo, foram contactadas algumas empresas fabricantes de depósitos de armazenamento e chegou-se à conclusão que existem duas possibilidades:

1. construir um depósito de betão armado, com um volume total de 220 m³;
2. adquirir depósitos de aço ou fibra de vidro, com um volume total de 220 m³.

Para a opção 1, dependendo da empresa de construção, deverá ser necessário cerca de 25 000 euros, enquanto para a opção 2 serão necessários cerca de 50 000 euros.

Para o dimensionamento efetuado serão necessários 116 m² de área de coletores, o que conduzia a um investimento de aproximadamente 20 000 euros.

No total, o investimento no depósito de armazenamento e nos coletores solares seria cerca de:

1. – 45 000 Euros;
2. – 70 000 Euros.

Nota: neste investimento inicial não estão incluídos os custos da tubagem nem dos ventiloconvectores.

Payback

Para se calcular o *payback*, em primeiro lugar é necessário estimar quanto seria gasto com a energia alternativa. Vejamos com o exemplo da eletricidade.

São necessários fornecer 30014,64 kWh/ano para manter o edifício a uma temperatura constante de 20°C todos os dias do inverno. Aplicando uma tarifa de 0,20 €/kWh, resulta que apenas num ano, gastar-se-ia 6003 euros apenas para aquecimento. Em 10 anos gastar-se-ia 60030 euros, e em 25 anos 150075 euros. Isto admitindo que a deriva de energia (aumento do preço da energia por cima do valor da inflação) é de zero por cento. Na tabela 5.6 é possível

consultar tudo o que foi dito, e ainda o *payback* do sistema para o pior caso (depósito de aço ou de fibra de vidro). Está, ainda, referenciado estimativas para as poupanças durante 25 anos.

Tabela 5.6 – *Payback* em relação à eletricidade e poupanças com o sistema solar para um período de 25 anos.

Necessidade (kWh/m²)	30014,64	
	1º ano	6 003
	.	.
Custo do aquecimento (€)	10º ano	60 030
	11º ano	66 033
	.	.
	25º ano	150 075
Payback em relação à eletricidade	11 anos	
	Depósito de betão armado	105 075
Poupança (€)		
	Depósito de aço/ fibra de vidro	80 075

Porém, só por si, esta análise não é suficiente. Será necessário analisar mais pormenorizadamente o ciclo de vida do sistema, podendo ser consultado na subsecção seguinte.

5.4.2 LCOE – *Levelised Cost of Energy*

O LCOE é hoje o principal indicador que permite comparar tecnologias renováveis de produção de eletricidade. Contudo, pode ser adaptado, de forma a comparar tecnologias solar térmicas. Basicamente este indicador calcula os custos totais de um sistema durante o seu tempo de vida, incluindo os custos do investimento e os custos de operação e manutenção, e comparar este custo com a estimativa da energia que o sistema irá produzir durante o mesmo período [27].

Em termos matemáticos a sua expressão é dada por:

$$\text{LCOE} = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{I_t + M_t + B_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{E_t}{(1+r)^t}} \quad (5.5)$$

em que:

t = tempo em anos;

n = tempo de vida do sistema;

r = taxa de desconto;

I_t = investimento inicial em $t=1$ ou de substituição num ano específico;

M_t = custo de operação e manutenção no ano t ;

B_t = custo de energia auxiliar no ano t ;

E_t = estimativa de energia produzida no ano t .

O LCOE é uma estimativa de custo antecipado e para a sua determinação é importante, não só a especificação correta dos custos de investimento inicial e de manutenção e a taxa de desconto, mas também o conhecimento da estimativa da energia produzida em cada ano. Torna-se por isso necessário conhecer com rigor o desempenho do sistema e como ele varia ao longo dos anos [27].

O tempo de vida do sistema é um parâmetro que depende da tecnologia envolvida e do local onde é instalado. Em geral, atualmente o tempo de vida do sistema solar é considerado como variando entre os 20 e os 25 anos [27].

O custo anual de operação e manutenção do sistema é em geral como uma percentagem do investimento inicial. É comum utilizar uma taxa de cerca de 1% do investimento inicial [29].

As taxas de desconto são variáveis de acordo com a evolução da economia. Quanto maior for o risco de um investimento maior é a taxa de desconto atribuída. Em geral é utilizado hoje um valor mínimo entre 6 a 7% [27].

O custo da energia auxiliar deverá ser considerado sempre que sistemas produtores tenham, ou um consumo de energia elétrica residual ou o consumo de energias fósseis.

A estimativa da energia produzida durante o tempo de vida do sistema vai depender da uma análise da produção de energia anual e também da forma como essa produção varia ao longo dos anos, sabendo que existirá uma diminuição da produção ao longo da vida útil do sistema.

Essa diminuição é tipicamente entre 0,5% a 1,0% do valor estimado para a produção inicial [27].

Tendo disponíveis os dados referidos é possível obter o valor do LCOE para qualquer tecnologia de produção de energia através da ferramenta de cálculo de LCOE desenvolvida no LNEG.

Posto isto, é calculado o LCOE do sistema solar para uma vida útil do sistema de 25 anos, com o depósito em betão e com o depósito de aço, o LCOE de uma caldeira a gás, e é comparado com o preço atual da eletricidade. Todos estes dados podem ser consultados na tabela 5.7.

Tabela 5.7 – Investimento, O&M e LCOE de várias tecnologias.

Método de aquecimento	Investimento inicial [€]	O & M [€/ano]	Taxa de desconto [%]	Degradação [%/ano]	LCOE [€/kWh]
Eletricidade	0	0	—	—	0,20
Caldeira a gás	15000	150	6	1	0,16
Sistema solar (depósito de betão)	45000	450	6	1	0,14
Sistema solar (depósito de aço)	70000	700	6	1	0,19

Como se observa os valores resultantes para o LCOE são muito sensíveis ao valor do investimento inicial, com a exceção da eletricidade que apenas é considerado o preço atual da eletricidade. Para o caso da caldeira a gás, para o cálculo do LCOE foi considerado um investimento em duas caldeiras durante 25 anos, após 12/13 anos de funcionamento seria trocada por outra, com uma tarifa de 0,065 €/kWh e deriva de energia a 2%. Assim, resulta um LCOE de 0,16 €/kWh.

Para o sistema de armazenamento sazonal, o fator importante é o investimento inicial, e este depende do tipo de depósito considerado. Para o sistema de armazenamento sazonal com depósito de betão resultou o LCOE mais baixo de todos, igual a 0,14 €/kWh. E para o sistema solar com depósito de aço resultou um LCOE de 0,19 €/kWh, mais baixo que o preço atual da eletricidade. Em ambos os casos, para o cálculo do LCOE foi considerado que ao fim de 12 anos o campo de coletores seria substituído por um novo (i.e. 2 campos de coletores em 25 anos).

Resumindo, o LCOE mais baixo resulta do sistema de armazenamento sazonal com depósito de betão, pois tem investimento mais baixo, e apesar do sistema solar com depósito de aço resultar um LCOE mais elevado comparativamente à caldeira de gás, trata-se de uma energia limpa e sustentável, e isso deverá ser levado em consideração.

Contudo, para o sistema solar com depósito em aço será ainda possível diminuir o LCOE. Para tal é necessário proceder a uma otimização, considerando, por exemplo e entre outros aspetos, o efeito do isolamento térmico a volta do depósito, e procurar depósitos mais baratos, como por exemplo em segunda mão.

Dimensionamento do sistema solar térmico para aquecimento de AQS

6

Este capítulo é destinado ao dimensionamento do sistema solar térmico para aquecimento de águas quentes sanitárias (AQS), para o edifício apresentado no caso anterior. Numa primeira fase, o método de cálculo é com base em valores médios mensais de radiação e todos os resultados obtidos são gerados a partir do *software* de simulação *Matlab*. Numa segunda fase, de forma a comparar e assegurar a autenticidade do sistema, é feita uma segunda simulação, desta vez no *software* de análise de desempenho de sistemas solares *SolTerm*.

É de referir que no primeiro caso é apresentado o método de cálculo simplificado, em que o coletor está virado a sul, com inclinação igual à latitude, admitindo que todo o armazenamento se encontra à mesma temperatura e que essa é a temperatura de entrada nos coletores. São apresentadas, apenas, as perdas pelo depósito, já que são as mais predominantes, e são desprezadas as perdas pela tubagem. É posta em prática uma técnica, denominada Reta de Carga, que nos permite saber a energia diária fornecida em média pelo sistema solar e a temperatura média final de armazenamento. É, ainda, apresentado a fração solar mensal e média anual.

Por fim é feita uma simulação com o programa *SolTerm* e uma otimização do sistema, se necessário, apresentando a análise energética obtida.

6.1 Método de cálculo das necessidades de energia para preparação da água quente sanitária

Começamos por admitir que em caso de aquecimento de água sanitária em vivendas, hotéis e residências, normalmente se consideram volumes do acumulador entre 60 e 90 l/m² de coletor, dependendo da temperatura de utilização desejada [28]. O principal motivo que leva a esta escolha de volume está relacionado com a quantidade de água que 1 m² de coletor pode aquecer por dia, e a temperatura máxima que ele consegue atingir. Supondo que temos um dia de Primavera (neste caso o dia médio mensal de Maio), com céu limpo, e que aquecemos água em Évora a partir de uma temperatura da rede de 20°C. Utilizando os dados de radiação para esse dia, calculámos a energia captada em cada hora, considerando a temperatura de entrada de 20°C na primeira hora. A temperatura máxima atingida nesse dia pode ser calculada através da seguinte expressão, e é o resultado é indicado na tabela 6.1:

$$Q = M C_p (T_o - T_i) \quad (6.1a)$$

$$T_o = \frac{Q}{M C_p} + T_i \quad (6.1b)$$

em que

Q = energia útil, isto é, é a energia captada menos as perdas do depósito,

M = massa de água,

T_o = temperatura de saída,

T_i = temperatura de entrada.

Tabela 6.1 – Temperatura máxima atingida para diferentes relações de V/A, no dia medio de Maio.

	Volume de armazenamento		
	60 l/m ²	75 l/m ²	90 l/m ²
T _{final}	76,9	65,5	58,0

Para este caso foi simulado um coletor com as seguintes características: F'η_o = 0,72 e F'U = 5,0 W/m².°C. Na prática, as temperaturas finais, nos três casos, não serão tão elevadas, pela simples razão que não há só dias de céu limpo. Portanto, se o objetivo for aquecer água

diariamente a 60 °C (que é a temperatura típica das instalações convencionais de água quente), podemos concluir que a escolha para o volume de armazenamento mais adequado é de 75 l/m². Portanto, para o dimensionamento efetuado, é este o valor tomado como referência.

Sabendo que o edifício estudado contém 28 quartos, cada um destinado a duas pessoas e um consumo de 50 l/pessoa a 60 °C, temos um consumo total diário de 2800 l a 60 °C. Considerando algum excesso de utilização, o consumo total diário aplicado será de 3000 l por dia. Assim, aceitando que escolhemos um volume de armazenamento de 75 l/m² temos uma necessidade de captação de 40 m².

Para o cálculo da fração solar mensal e anual, temos de saber, para cada mês, a energia despendida com sistemas convencionais utilizados na preparação das AQS, Q_a , e é dada pela seguinte expressão:

$$Q_a = M C_p (T_u - T_r) \quad (6.2)$$

em que

C_p = calor específico do líquido,

T_u = temperatura de utilização,

T_r = temperatura média da água da rede.

Os coletores caracterizados por $F'\eta_o = 0,72$ e $F'U = 5,0 \text{ W/m}^2\cdot\text{°C}$, estão colocados com uma inclinação igual à latitude e exatamente virados a sul. Como estamos a trabalhar em termos de T_{in} e admitindo um fluxo de circulação de 1 l/min.m², passamos a ter: $F_R\eta_o = 0,695$ e $F_RU_L = 4,825 \text{ W/m}^2\cdot\text{°C}$.

No caso do aquecimento de água para uso doméstico, qualquer temperatura entre a da rede e os 60°C é útil, aquecendo a água progressivamente desde a primeira hora até atingir o seu máximo e voltando a diminuir, durante o tempo em que o sistema funciona. Durante todo este tempo, a água aquecida é armazenada num depósito cujas perdas térmicas são descritas pela seguinte expressão:

$$Q_{perdas} = A_{dep} U_{dep} (T_{in} - T_{env}) \Delta t \quad (6.3)$$

em que

A_{dep} = área lateral do depósito,

U_{dep} = fator de perdas do depósito (tipicamente igual a $1 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$),

T_{env} = temperatura do ambiente em que se encontra o depósito,

Δt = número de segundos de um dia (86400 s).

Para as expressões 6.2 e 6.3 admite-se que o depósito se encontra no interior, logo temos $T_{env} = 20^\circ\text{C}$, e que a temperatura média da rede ao longo do ano tem os seguintes valores:

$$T_r = \begin{cases} 10^\circ\text{C} - \text{Novembro, Dezembro, Janeiro, Fevereiro e Março} \\ 15^\circ\text{C} - \text{Abril, Maio, Setembro e Outubro} \\ 20^\circ\text{C} - \text{Junho, Julho e Agosto} \end{cases}$$

A soma da energia de perdas dada pela expressão 6.3 com a quantidade de energia captada à medida que T_{in} vai aumentando, representa a quantidade total de energia $Q(T)$ a fornecer para que o depósito fique à temperatura T_{in} , compensando as perdas térmicas diárias a essa temperatura:

$$Q(T) = \frac{V_{dep} C_p (T_{in} - T_r)}{A_c} + \frac{A_{dep} U_{dep} (T_{in} - T_{env}) \Delta t}{A_c} \quad (6.4)$$

em que

V_{dep} = volume do depósito.

A expressão 6.4 é a equação de uma reta a que se pode chamar Reta de Carga, ou, mais genericamente, família de retas de carga, se for considerado que a temperatura da água da rede varia ao longo do ano. Para cada mês, se sobrepusermos estas retas às curvas da energia fornecida pelo sistema a medida que T_{in} vai aumentando, o ponto de interseção da reta de carga correspondente com a curva do mês respetivo, dá a energia fornecida em média pelo sistema (Q em $\text{MJ/m}^2 \cdot \text{dia}$) e a temperatura final média do armazenamento (T_{arm} em $^\circ\text{C}$). Este método é posto em prática para todos os meses, variando a temperatura de entrada nos coletores de 20 a 90°C , e o resultado obtido pode ser consultado na figura 6.1.

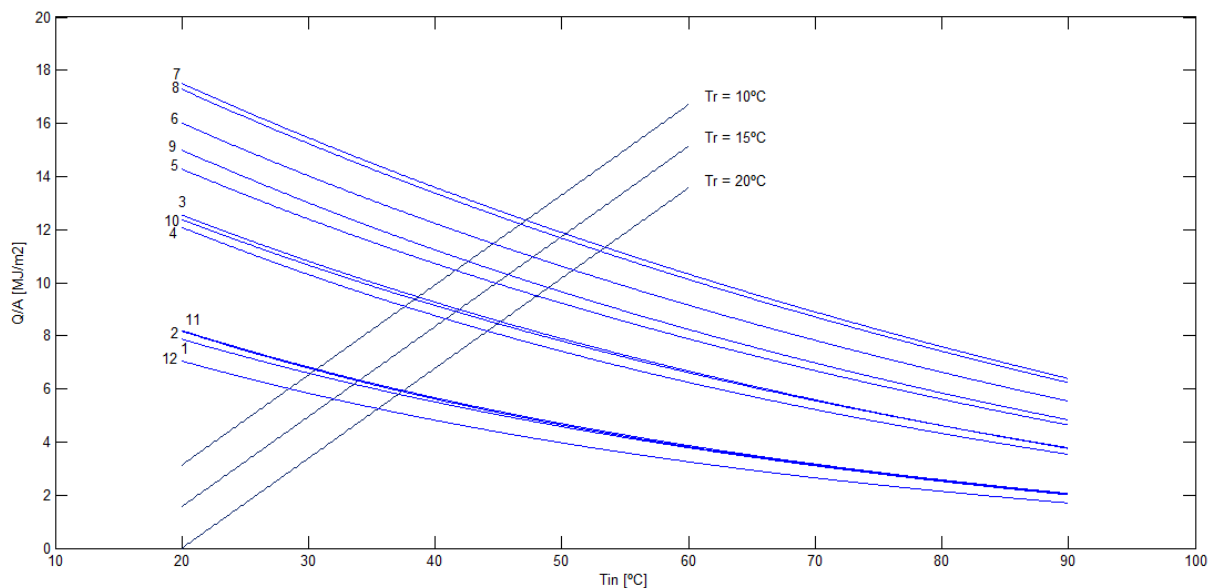


Figura 6.1 – Curvas de $Q_{mês}/N$ e respetiva reta de carga.

Fazendo uma breve análise da figura 6.1, convém salientar que não é evidente que a interseção entre as curvas para cada mês e a reta de carga seja de imediato a resposta ao nosso problema, tem um pequeno erro associado. Contudo, é uma ótima ferramenta de consulta e de uma estimativa aproximada do nosso sistema solar térmico. Este método é útil quando se pretende estudar o comportamento do sistema a longo prazo, a partir de valores médios diários. Se o objetivo for estudar o comportamento do sistema de uma forma mais detalhada e precisa, este não será a solução mais adequada. Ora vejamos, o valor $Q(T_{arm})$ representa a energia captada em média pelo sistema, se este estiver todo o dia a funcionar à mesma temperatura, desde o nascer do sol até ao pôr-do-sol. Sabemos desde logo que isto não acontece, de manhã a água está à temperatura da rede e vai subindo progressivamente, o que significa que neste período o sistema funciona com rendimentos superiores aos que correspondem ao nível crítico definido T_{arm} . Por outro lado, depois de ser atingido o nível crítico T_{arm} , a temperatura do fluido continua a subir e o sistema, nesta fase, funciona com rendimentos inferiores aos que correspondem ao nível crítico T_{arm} . Portanto podemos concluir que este método pode ser considerado válido e o erro cometido deverá ser muito baixo, na ordem dos 3 a 4% [10].

Aplicando este método, para a latitude correspondente a Évora, traçando as três retas de carga na figura 6.1 e fazendo as interseções de $Q(T)$ com $Q_{mês}$ resultam os valores de Q (em MJ/m².dia) e T_{arm} (em °C), que podem ser consultados na tabela 6.2.

Tabela 6.2 – Energia diária fornecida em média pelo sistema solar e temperatura média final de armazenamento.

	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Q	6,58	6,72	9,47	8,63	9,98	10,48	11,34	11,19	10,31	8,9	6,75	6
T _{arm}	30,1	30,5	38,6	40,9	44,8	50,9	53,4	53	45,7	41,7	30,6	28,5

Na tabela 6.2 são apresentados todos os dados necessários para proceder ao dimensionamento do sistema solar pretendido. Com a equação 6.2 é possível calcular os valores médios diários da energia necessária para o consumo, sabendo que pretendemos utilizar 3000 l de água por dia. É possível calcular a energia total fornecida pelo sistema, multiplicando $Q(T_{arm})$ pela área de captação pretendida. A energia de perdas do depósito é calculada a partir da equação 6.3 considerando T_{in} como se fosse T_{arm} . Finalmente, é possível calcular a fração solar mensal, através da seguinte equação:

$$F = \frac{Q_{mês} - Q_{perdas}}{Q_a} \quad (6.5)$$

Todos os resultados pertinentes para o dimensionamento da instalação coletiva estão representados na tabela 6.3, em que Q_a , Q_m e Q_p são apresentados em MJ/dia e F em %.

Tabela 6.3 – Resultado do dimensionamento da instalação coletiva.

	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Q _a	627	627	627	564,3	564,3	501,6	501,6	501,6	564,3	564,3	627	627
Q _m	263,3	268,7	378,8	345,1	399,2	419,1	453,5	447,7	412,4	356,1	269,8	240,1
Q _p	10,4	10,8	19,1	21,5	25,5	31,8	34,3	33,9	26,4	22,3	10,9	8,7
F	40,3	41,1	57,4	57,4	66,2	77,2	83,6	82,5	68,4	59,2	41,3	36,9

Como seria de esperar, os meses com maior fração solar são os meses de verão e os meses com menor fração solar são os meses de inverno. Para o dimensionamento efetuado com 40 m² de área coletora e 3 m³ de capacidade do depósito verifica-se que a fração solar anual é de 59,3%. O sistema assim dimensionado deverá ser apoiado por outro sistema, por exemplo a gás ou eletricidade, de modo a compensar a energia em falta.

Como foi dito anteriormente, normalmente se consideram volumes do acumulador entre 60 e 90 l/m² de coletor, dependendo da temperatura desejada e da fração solar pretendida. Portanto,

de modo a facilitar a compreensão dos leitores, foi feita uma simulação para os três casos (60, 75 e 90 l/m²) e registados os valores da fração solar mensal na tabela 6.4. O que foi feito neste caso, foi manter o volume do depósito sempre constante, 3 m³, e alterar a área de coletores de modo a atingir a relação desejada. Passar de 75 l/m² para 60 l/m² é o mesmo que dizer que passamos a ter 50 m² de coletor em vez de 40 m². E quanto maior a área de coletores, para o mesmo volume de armazenamento, maior será a fração solar mensal, tal como pode ser comprovado na tabela abaixo apresentada. Os passos do cálculo são sempre os mesmos, primeiro calcular as retas de carga (ver anexo 4), interseção com as curvas de cada mês e tirar Q e T_{arm} , multiplicar Q com a área de coletores e usar T_{arm} para calcular as perdas térmicas do depósito. Por fim é possível calcular a fração solar mensal através da equação 6.5. Para a relação 60 l/m² a fração solar média anual é de 68,9%, para a relação 75 l/m² a fração solar média é de 59,3% e, por fim, para a relação 90 l/m² de coletor a fração solar média anual é de 51,9%.

Tabela 6.4 – Fração solar mensal para diferentes relações de V/A.

V/A	Fração solar mensal											
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
60 l/m ²	47,1	47,9	66,4	66,7	77,0	89,7	96,8	95,6	79,2	69,0	48,1	43,2
75 l/m ²	40,3	41,1	57,4	57,4	66,2	77,2	83,6	82,5	68,4	59,2	41,3	36,9
90 l/m ²	35,3	36,1	50,5	50,5	58,0	67,9	73,6	72,6	58,2	52,0	36,2	32,3

6.2 Dimensionamento de AQS recorrendo ao programa *SolTerm*

Os regulamentos nacionais para o comportamento térmico dos edifícios, nomeadamente o RCCTE e o REH, definem que a contribuição de sistemas de coletores solares para o aquecimento da AQS deve ser calculada utilizando o programa *SolTerm* do LNEG. A contribuição de sistemas solares só pode ser contabilizada, para efeitos dos regulamentos, se os sistemas ou equipamentos forem certificados de acordo com as normas e legislações em vigor, instalados por instaladores acreditados pela DGGE e, cumulativamente, se houver a garantia de manutenção do sistema em funcionamento eficiente durante um período mínimo de seis anos após a instalação [20], [21].

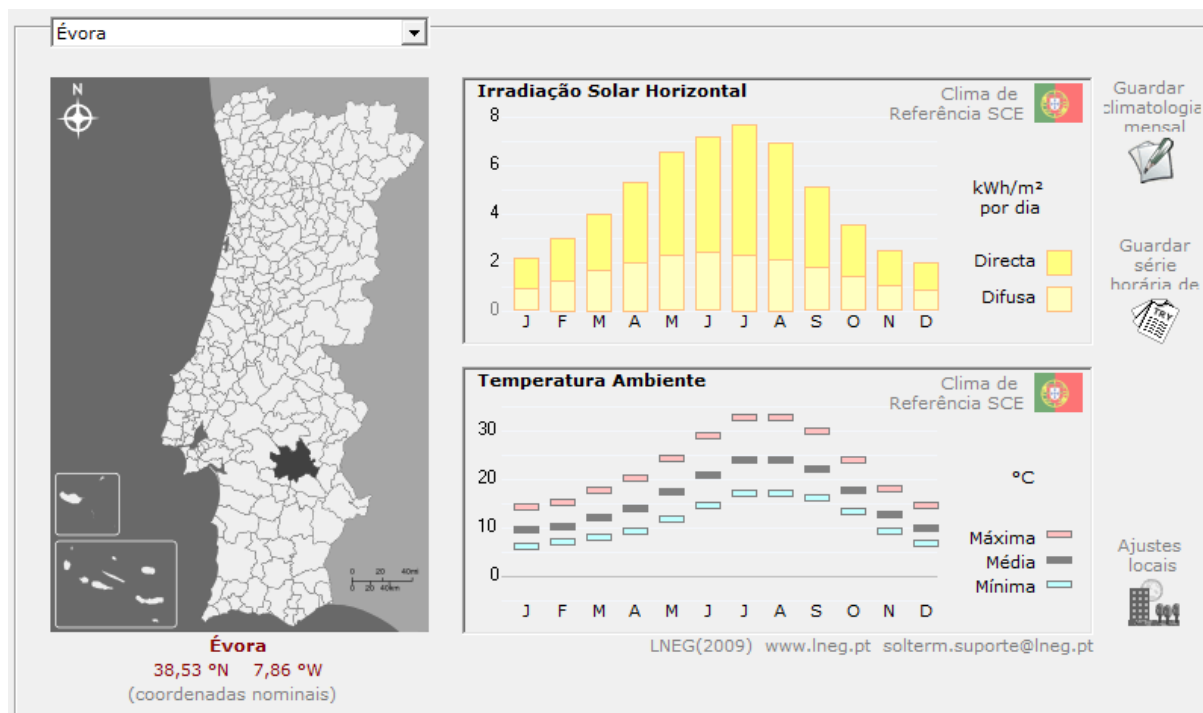


Figura 6.2 – Página inicial do programa SolTerm, desenvolvido pelo LNEG.

Os perfis de consumo do edifício analisado estão descritos na tabela 6.5 e foram obtidos com base nas necessidades da maioria dos alunos universitários de Évora. As horas e os meses de utilização também foram tomadas em conta na construção do perfil de consumo. O mês de Agosto foi considerado como nulo, devido ao facto de a maioria das residências universitárias na cidade de Évora se encontrarem encerradas nesse período. O consumo total diário em todos os meses, com exceção do mês de Agosto, é igual a 3000 l/dia.

Tabela 6.5 – Perfil de consumo de água quente ao longo do dia e em todos os meses do ano.

Hora	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
8	100	500	500	500	500	100	100	0	500	500	500	500
9	100	200	200	200	200	100	100	0	200	200	200	200
10	200	100	100	100	100	200	200	0	100	100	100	100
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	500	100	100	100	100	500	500	0	100	100	100	100
13	200	200	200	200	200	200	200	0	200	200	200	200
14	100	100	100	100	100	100	100	0	100	100	100	100
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

17	100	100	100	100	0	0	0	0	0	100	100	100
18	200	200	200	200	200	100	100	0	200	200	200	200
19	500	500	500	500	500	200	200	0	500	500	500	500
20	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	0	1000	1000	1000	1000
21	0	0	0	0	100	500	500	0	100	0	0	0
Total	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	0	3000	3000	3000	3000

Admitindo que em todos os meses do ano o edifício analisado é composto por 56 utilizadores e no mês de Agosto encontrar-se-á encerrado, resulta uma necessidade de AQS de 3000 l/dia. Admitindo, ainda, que a temperatura da água da rede é conforme apresentado na tabela 6.6, é apresentado a necessidade energética diária e mensal a partir da expressão 6.2.

Tabela 6.6 – Número de utilizadores e necessidade energética diária e mensal.

Meses	Número de utilizadores	Necessidades AQS / dia	Temp. água da rede	Necessidade Energética – Qa	
				Diária	Mensal
		[Litros]	[°C]	[kWh]	[kWh]
Jan	56	3000	10	174,4	5407
Fev	56	3000	10	174,4	4884
Mar	56	3000	10	174,4	5407
Abr	56	3000	15	157,0	4709
Mai	56	3000	15	157,0	4866
Jun	56	3000	20	139,5	4186
Jul	56	3000	20	139,5	4326
Ago	0	0	20	0,0	0
Set	56	3000	15	157,0	4709
Out	56	3000	15	157,0	4866
Nov	56	3000	10	174,4	5233
Dez	56	3000	10	174,4	5407

6.2.1 Caracterização do sistema

O sistema solar térmico considerado para efeitos de cálculo consiste em 20 coletores solares, com as seguintes características:

- área = 2,00 m²;
- a₁ = 4,83 W/m² °C;

- $\eta_o = 0,72$.

O depósito, com uma capacidade de 3000 litros, é composto por um permutador de calor com uma eficácia de 55%. É colocado no interior, na posição vertical, e é feito de inox. O coeficiente de perdas térmicas considerado é $1 \text{ W/m}^2\cdot\text{°C}$.

Relativamente ao sistema de apoio considerado será suportado por eletricidade da rede.

A configuração simplificada do sistema solar térmico é apresentada na figura 6.3.

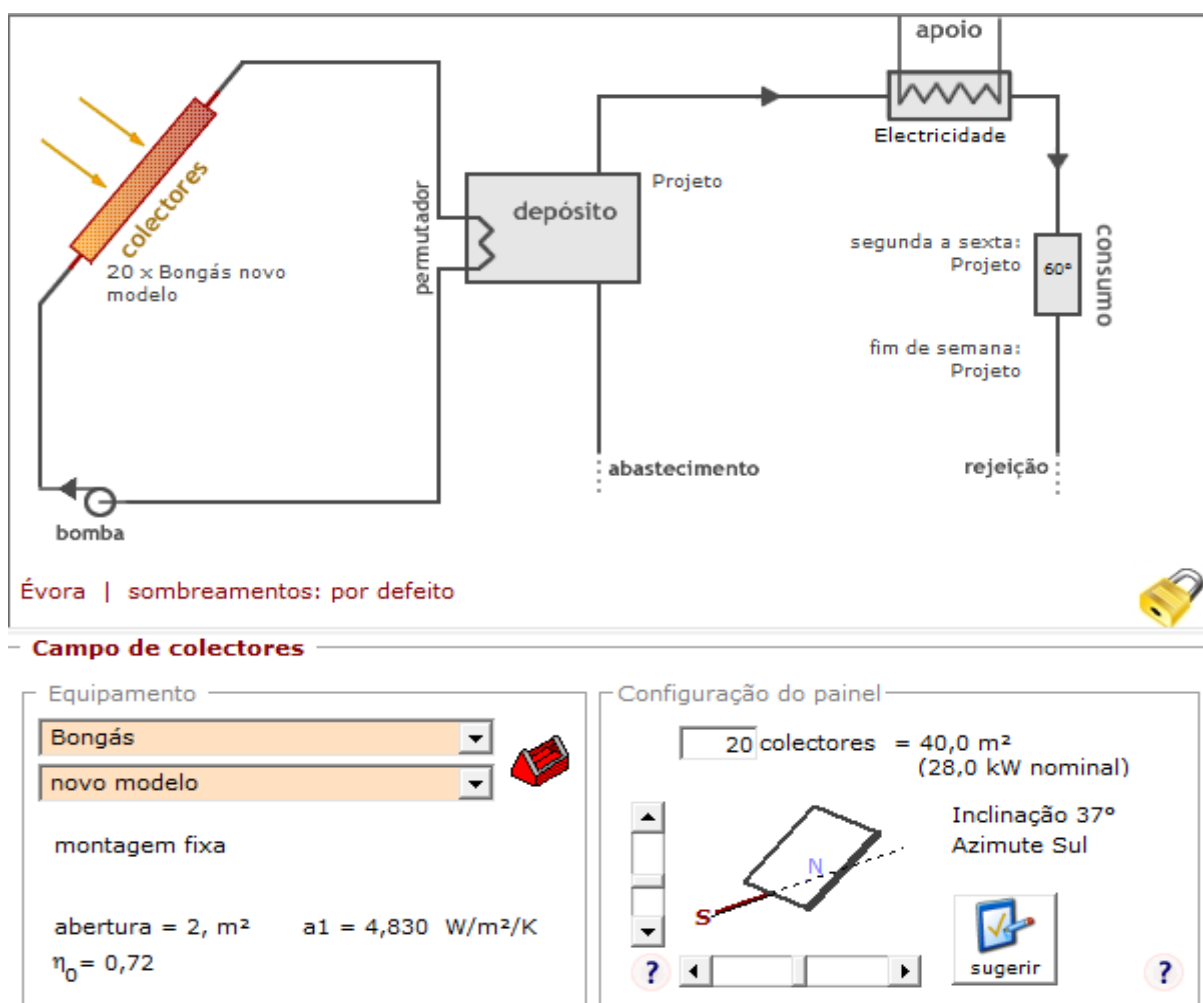


Figura 6.3 – Configuração de sistema solar com permutador interno, retirado do programa SolTerm.

6.2.2 Análise energética

Após o dimensionamento do sistema solar térmico, é possível executar o programa e ter acesso à análise energética do sistema. Os resultados obtidos pela simulação do programa SolTerm podem ser consultados na figura 6.4. Pelos resultados obtidos, sem ser feito qualquer otimização, a fração solar média anual é de 54%, e o rendimento global anual do sistema é de 37%. É importante referir que o resultado obtido da fração solar é mais baixo que no cálculo anterior devido ao facto que, neste caso, não é contabilizado o mês de Agosto.

Desempenho do sistema térmico		Projecto: projecto exemplo 01				
	Rad.Horiz.	Rad.Inclin.	Desperdiçado	Fornecido	Carga	Apoio
	kWh/m ²	kWh/m ²	kWh	kWh	kWh	kWh
Janeiro	67	112	,	2039	5407	3368
Fevereiro	83	120	,	2065	4884	2819
Março	124	151	,	2569	5407	2838
Abril	159	169	,	2679	4709	2031
Mai	203	194	,	3093	4866	1773
Junho	217	197	,	2985	4186	1201
Julho	238	222	,	3556	4326	769
Agosto	216	221	,	0	0	0
Setembro	155	181	,	3326	4709	1384
Outubro	111	152	,	2666	4866	2201
Novembro	75	121	,	2224	5233	3008
Dezembro	62	107	,	1949	5407	3458
Anual	1709	1946	,	29149	53999	24850

Fracção solar: 54,0%

Rendimento global anual do sistema: 37% Produtividade: 729 kWh/[m² colector]

Figura 6.4 – Análise energética do sistema solar térmico, obtido através da ferramenta SolTerm.

A interface análise energética apresenta várias colunas com valores mensais, bem como o valor anual. Estas colunas correspondem a:

- Radiação horizontal – energia acumulada da radiação solar global na horizontal à superfície, por unidade de área (kWh/m²) [29].
- Radiação no plano inclinado – energia acumulada da radiação solar global à face dos coletores solares, por unidade de área (kWh/m²), portanto num plano inclinado [29].
- Desperdiçado – energia acumulada que o sistema solar capta mas tem de dissipar (kWh). O desperdício de energia recolhida surge quase sempre por se ultrapassarem limites de temperatura de armazenamento de água em situações em que o consumo é pequeno ou nulo [29].

- Fornecido – energia acumulada que o sistema fornece para o consumo (kWh). Trata-se da energia final útil [29].
- Carga – valor acumulado da energia solicitada para consumo (kWh) [29].
- Apoio – energia acumulada entregue para consumo pelo sistema de apoio, ou auxiliar, para complementar a energia fornecida pelo sistema solar (kWh) [29].

Contudo é necessário otimizar o sistema, de modo a aumentar a fração solar, pois para este tipo de sistemas com consumo todo o ano é costume dimensiona-lo para que a fração solar no verão seja de aproximadamente 100% e no inverno a 50%, dando uma média anual de 75%. Desta forma não há desperdício de energia e rentabiliza-se o investimento. Para aumentar a fração solar existem dois constrangimentos, manter a área de coletores ou manter o volume de armazenamento. Neste estudo em questão, o interesse é manter o volume de armazenamento.

Assim sendo, é feita a otimização, de modo a não haver desperdícios, e o resultado obtido pode ser consultado na figura 6.5. Feita a otimização, a área de coletores aumentou de 40 m² para 68 m², e isto traduzido em número de coletores, passou de 20 para 34 módulos.

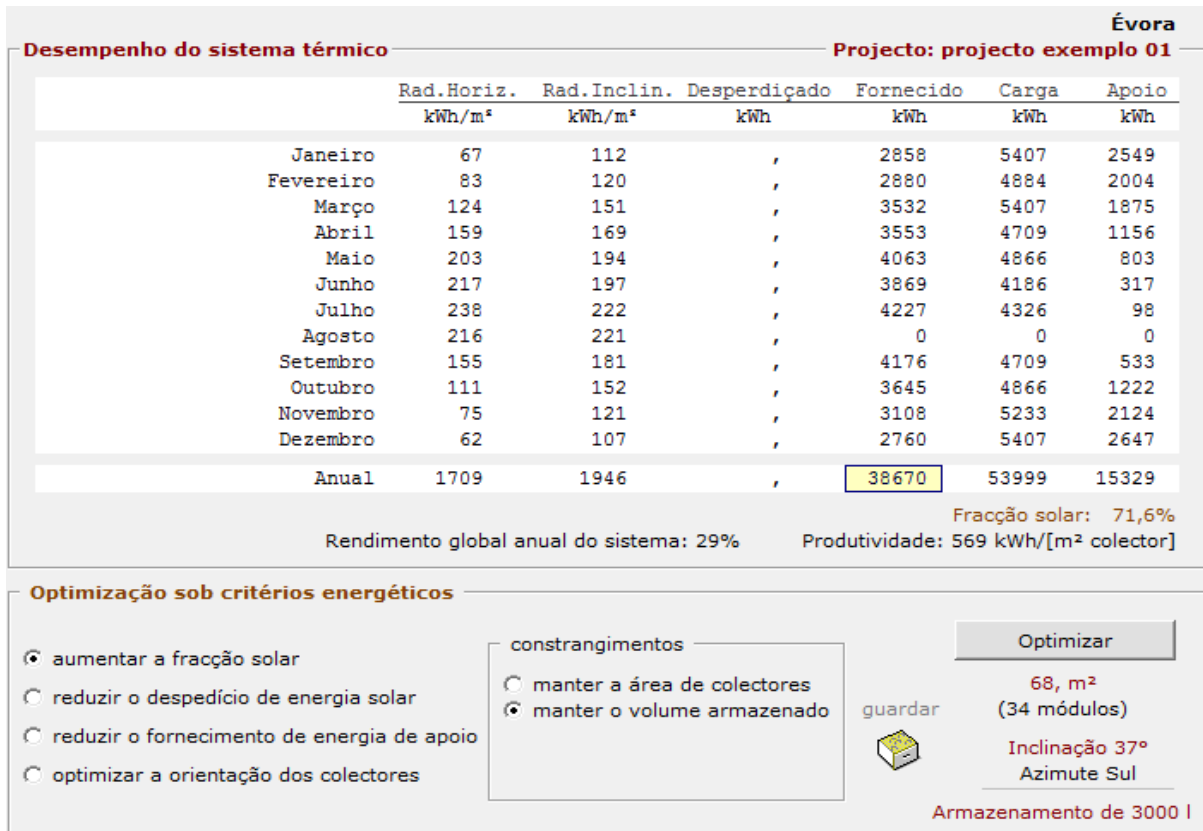


Figura 6.5 – Análise energética otimizada do sistema solar térmico, obtido através da ferramenta SolTerm.

6.2.3 Análise económica

A análise económica de qualquer sistema solar é fundamental, de forma a prever a rentabilidade do mesmo. A ferramenta SolTerm tem a vantagem de fornecer também esta análise e a leitura é relativamente fácil de ser feita. A análise económico-financeiro parte de um simples balanço de receitas e despesas para o caso da adoção de um sistema solar e para a solução alternativa em que se continua a comprar toda a energia, de forma convencional. Este balanço é feito para o tempo de vida útil do sistema, normalmente considerado de 20 anos. [29]

As várias receitas e despesas são afetadas em cada ano pela inflação que, embora seja difícil de prever, é razoável admitir uma inflação de 1% ao ano. As despesas de compra da energia convencional são afetadas adicionalmente pela deriva do preço desta energia. A deriva do preço da energia significa o aumento percentual da energia convencional (que seja parcialmente substituída por energia solar), acima do nível da inflação. Assim, considerando a inflação igual a 1% ao ano, e a deriva do preço da energia for 2%, o aumento do preço da energia será de 3% ao ano. [29]

Tipicamente os custos de operação e manutenção consideram-se 1% do custo total do sistema.

Relativamente ao investimento, para este tipo de sistemas é razoável admitir que o preço de compra varia entre 500 e 600 euros por metro quadrado de coletores, dependendo da qualidade dos mesmos. Assim sendo, admitindo que a componente variável seja de 500 €/m², resulta um investimento total de 34000 euros.

Sabendo que o preço atual da energia substituída é de 0,169 €/kWh, com o sistema solar existe uma vantagem de 111953 euros ou de 91750 euros, considerando o valor atual do preço da energia.

Com este sistema solar, otimizado desta forma, a recuperação do capital ocorre ao 8º ano, e, portanto, o sistema solar pode ser considerado compensador.

Na figura 6.6 são apresentados todos os dados relevantes acerca da análise económico-financeiro do sistema solar desenhado, fornecidos pelo programa SolTerm.

<p>Investimentos</p> <p>Área do painel 68,0 m²</p> <hr/> <p>Preço do sistema solar: 34000 €</p> <p>Componente fixa <input type="text" value="0"/> €</p> <p>Componente variável <input type="text" value="500"/> € / m²</p> <hr/> <p>Incentivos: 0 €</p> <p>Componente fixa <input type="text" value="0"/> €</p> <p>Componente variável <input type="text" value="0"/> € / m²</p>	<p>Cenário financeiro sobre 20 anos</p> <p>Inflação <input type="text" value="1,0%"/> ao ano Deriva do preço da energia substituída <input type="text" value="2,0%"/> acima da inflação</p> <p>Rendimento de aplicação financeira segura <input type="text" value="2,5%"/> ao ano</p>												
<p>Operação e manutenção</p> <p>Vida útil <input type="text" value="20"/> anos</p> <p>Manutenção anual <input type="text" value="1,0%"/> do preço do sistema (340 €)*</p> <p>Renovação de componentes <input type="text" value="1,0%"/> do preço do sistema (340 €)*</p> <p>Valor residual (salvados) <input type="text" value="0,0%"/> do preço do sistema (0 €)*</p>	<p>Analisar interesse quando...</p> <p><input checked="" type="radio"/> há capital disponível para investir</p> <p><input type="radio"/> é necessário um empréstimo bancário</p>												
<p>Valorização da energia</p> <p>Preço da energia substituída <input type="text" value="0,169"/> €/kWh (0,047 €/MJ)*</p> <p>Custo da energia solar produzida <input type="text" value="0,044"/> €/kWh (0,012 €/MJ)*</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Sistema solar</th> <th>Alternativa</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Compra do sistema: -34000 €</td> <td>Aplicação de capital: -34000 €</td> </tr> <tr> <td>Manutenção: -7561 € Reparações: -379 €</td> <td>Custos de energia: -245216 €</td> </tr> <tr> <td>Custos de energia (apoio): -69610 € (Custos de energia evitados: 175606 €)</td> <td></td> </tr> <tr> <td>De reinvestimentos: 41208 € Valor residual: 0 €</td> <td>Rendimentos: 21713 € Restituição do capital: 34000 €</td> </tr> <tr> <td>Balanço final: -111551 € (-91421 €)*</td> <td>Balanço final: -223503 €(-183171 €)*</td> </tr> </tbody> </table> <p>Vantagem: 111953 € (91750 €)*</p> <p>Instalação de sistema solar compensadora (nestas condições).</p> <p>Recuperação do capital ao 8º ano</p> <p style="text-align: right; border: 1px solid black; padding: 5px;">Optimização económica</p>	Sistema solar	Alternativa	Compra do sistema: -34000 €	Aplicação de capital: -34000 €	Manutenção: -7561 € Reparações: -379 €	Custos de energia: -245216 €	Custos de energia (apoio): -69610 € (Custos de energia evitados: 175606 €)		De reinvestimentos: 41208 € Valor residual: 0 €	Rendimentos: 21713 € Restituição do capital: 34000 €	Balanço final: -111551 € (-91421 €)*	Balanço final: -223503 €(-183171 €)*
Sistema solar	Alternativa												
Compra do sistema: -34000 €	Aplicação de capital: -34000 €												
Manutenção: -7561 € Reparações: -379 €	Custos de energia: -245216 €												
Custos de energia (apoio): -69610 € (Custos de energia evitados: 175606 €)													
De reinvestimentos: 41208 € Valor residual: 0 €	Rendimentos: 21713 € Restituição do capital: 34000 €												
Balanço final: -111551 € (-91421 €)*	Balanço final: -223503 €(-183171 €)*												

Figura 6.6 – Análise económica do sistema solar térmico otimizado, obtido através da ferramenta SolTerm.

Conclusão

Os principais objetivos da investigação descrita nesta dissertação são projetar e avaliar o desempenho de um sistema de armazenamento sazonal de energia solar térmica, que pode ser acoplado a um conjunto de coletores solares, utilizado para aquecimento do setor doméstico em Évora, Portugal. Todos os cálculos efetuados são relativos ao projeto da Residência Alcaçarias, entretanto já apresentado à Universidade de Évora, faltando apenas a decisão da Reitoria. Em primeiro lugar foram calculadas as perdas térmicas totais do edifício, de acordo com o método de cálculo do Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE). O objetivo foi, desde o princípio, alcançar os 20 kWh/m².ano de necessidades nominais de aquecimento (N_{ic}), um valor exigente mas possível a nível nacional. Isto é possível, para o caso de estudo, isolando termicamente todas as fachadas e as coberturas exteriores com 10 centímetros de placas de poliestireno expandido moldado (EPS), sendo para outros edifícios uma ordem de grandeza a considerar e não um valor exato aplicável a todos os edifícios. Como o valor das necessidades de aquecimento é baixo, conduz a que o sistema solar e o volume de armazenamento seja mais pequeno e, por sua vez, leva a que o investimento no sistema ativo seja mais baixo. Aliás, a grande desvantagem deste tipo de sistema é precisamente o investimento inicial elevado que está associado e que importa minimizar. Fazendo uma breve revisão bibliográfica, chega-se a conclusão que apenas alguns países com maior poder financeiro praticam esta alternativa de aproveitamento da energia solar para climatização de edifícios. É o caso da Áustria, da Suíça, da Alemanha, da Irlanda, etc. Em Portugal não se verifica nenhum exemplo, até ao momento, contudo, faz todo o sentido começar a ser posto em prática. Enquanto nos países nórdicos, para se conseguir o aquecimento ambiente 100% solar,

o investimento inicial é muito dispendioso, em Portugal este valor pode chegar a ser duas vezes mais pequeno. Até ao momento, o mercado Português não permite aquecimento ambiente com base no funcionamento de um sistema solar durante o inverno, pois implica um grande sistema solar e muita sobra de energia mais de metade do ano (“*dumping*”), o que faz não rentabilizar o investimento. Contudo, 100% de aquecimento ambiente com armazenamento de energia, do verão para o inverno, implica um sistema solar mais pequeno, não tem desperdícios e rentabiliza o investimento. O seu investimento é competitivo e dilui-se no custo da construção do edifício, enquanto o sistema solar custa menos de 50 euros pelo metro quadrado do edifício a aquecer, a construção do próprio edifício custa entre, pelo menos, 1000 e 1500 euros por metro quadrado. Como já foi referido, 17% do consumo da energia final em Portugal é destinado ao setor doméstico, sendo que 20% é destinado ao aquecimento ambiente. Esta solução seria capaz de diminuir significativamente esta percentagem e caso este projeto seja demonstrado com sucesso na Residência Alcaçarias, esta solução poderá abrir **um novo mercado para a térmica solar de baixa temperatura**, sobretudo no mercado das novas construções ao nível doméstico e no mercado dos edifícios recuperados.

Como foi demonstrado no capítulo 6, o LCOE do sistema de armazenamento sazonal é de 0,14 e 0,19 €/kWh caso seja utilizado depósito de betão ou de aço, respetivamente. Valores estes, bastante competitivos e interessantes, podem vir a ser mais vantajosos caso o investimento inicial diminua. Para tal, tem de se procurar alternativas para os depósitos apresentados e procurar diminuir as necessidades nominais de energia para aquecimento. É necessário, ainda, estudar pormenorizadamente o efeito do isolamento térmico no depósito.

O isolamento térmico irá reduzir as perdas térmicas do depósito para o exterior, e por consequente, reduzirá o tamanho do sistema solar. Portanto é necessário estudar e otimizar estes dois fatores, de modo a que o LCOE seja o mais baixo possível. A título de exemplo, na tabela 7.1 é apresentado uma breve análise da influência do isolamento térmico do depósito de acumulação no sistema total de armazenamento sazonal, admitindo que se trata de um depósito cilíndrico com um fator de forma de 1,75.

Tabela 7.1 – Influência do isolamento térmico do depósito no volume de armazenamento e área de coletores.

EPS [m]	U [W/m ² .°C]	Volume armazenamento [m ³]	Área coletores [m ²]
0,05	0,90	190	200
0,10	0,45	220	130
0,15	0,30	240	100
0,20	0,23	240	85
0,25	0,18	250	77
0,30	0,15	250	72
0,35	0,13	250	70
0,40	0,11	260	67
0,45	0,10	260	65
0,50	0,09	260	63

O isolamento térmico tem bastante impacto, sendo, por isso, necessário analisar com muita atenção este tópico e concluir até que ponto a diminuição do sistema solar compensa no investimento do isolamento térmico. Será necessário proceder ao cálculo do LCOE novamente para todos estes casos.

Relativamente ao sistema de águas quentes sanitárias, é do conhecimento geral a importância e o impacto desta tecnologia. Aliás, hoje em dia nem faz sentido não optar por esta solução. E quanto maior for o número de ocupantes, maior será o impacto e os benefícios. Basta relembrar a análise económica deste estudo, em que a vantagem (poupança) será de aproximadamente 100 000 euros num período de 20 anos. E, para além do mais, facilmente se consegue um *payback* entre 6 e 7 anos, e a partir daí haverá apenas poupanças.

Na aplicação destes conceitos, alternativas como a da gestão/condução conjunta dos dois sistemas, AQS e armazenamento sazonal poderá e deverá ser feita em conjunto, com redução do investimento e dos custos de operação.

Para a Universidade de Évora, esta solução de armazenamento sazonal de energia solar térmica a baixa temperatura para climatização de edifícios, representa uma contribuição pioneira, com potencial para um grande destaque em Portugal e fora.

8

Desenvolvimentos futuros

Esta solução é inovadora e pode vir a abrir um novo mercado para a térmica solar de baixa temperatura em Portugal. Contudo, existem alguns aspetos que podem ser desenvolvidos e melhorados.

Primeiro aspeto a ter em consideração é procurar diminuir as necessidades nominais de energia destinada ao aquecimento. Para tal, é essencial o isolamento térmico nas fachadas exteriores e nas coberturas exteriores. Os vãos envidraçados deverão ser pelo menos duplos e orientados a sul de preferência.

Estudar técnicas passivas em paralelo é também uma possibilidade muito importante. Como por exemplo aplicar palas horizontais na parte superior dos vãos envidraçados, para que façam sombreamento no verão e deixem passar a radiação solar no inverno. A orientação do edifício é fundamental, devendo sempre a parte mais alargada ser orientada a sul, no hemisfério norte. Plantar árvores de folha caduca junto às janelas é outra técnica passiva eficaz, são capazes de obstruir a radiação solar no verão e deixá-la passar no inverno.

Para um estudo mais detalhado, será necessário estudar e analisar as perdas térmicas ao longo das tubagens. De um modo geral é adequado considerar 3 a 4% da energia total para as perdas térmicas pelas tubagens, contudo pode ser interessante calcular analiticamente este valor.

A parte mais importante e interessante desta solução é procurar combinar o sistema de armazenamento sazonal de energia solar térmica com o sistema de AQS. Esta seria a solução mais inteligente e haverá um melhor aproveitamento da energia solar. Para tal, é necessário estudar e implementar um sistema automático de controlo, em que, por exemplo, quando o

depósito de AQS atinge a temperatura de utilização, uma válvula de três vias funciona e desvia o fluido solar para o tanque de armazenamento sazonal. Assim dois parâmetros são atingidos:

- O depósito de AQS é aquecido de tal modo que a fração solar é muito elevada;
- Qualquer excesso de calor não é dissipado, existindo melhor aproveitamento da energia solar.

Com este programa de controlo seria possível atingir frações solares de aproximadamente 100% em qualquer altura do ano, quer para as águas quentes quer para a climatização ambiente.

Nesta e noutras zonas do país e para outras situações de aquecimento ambiente – por exemplo novos edifícios de habitação, construção de raiz – poderão ser obtidas condições ainda mais favoráveis a uma pratica que, um vez demonstrada em Évora, poderá ser adotada em qualquer lado, para, como dissemos abrir um novo mercado à energia solar térmica, com grande interesse económico.

Referências Bibliográficas

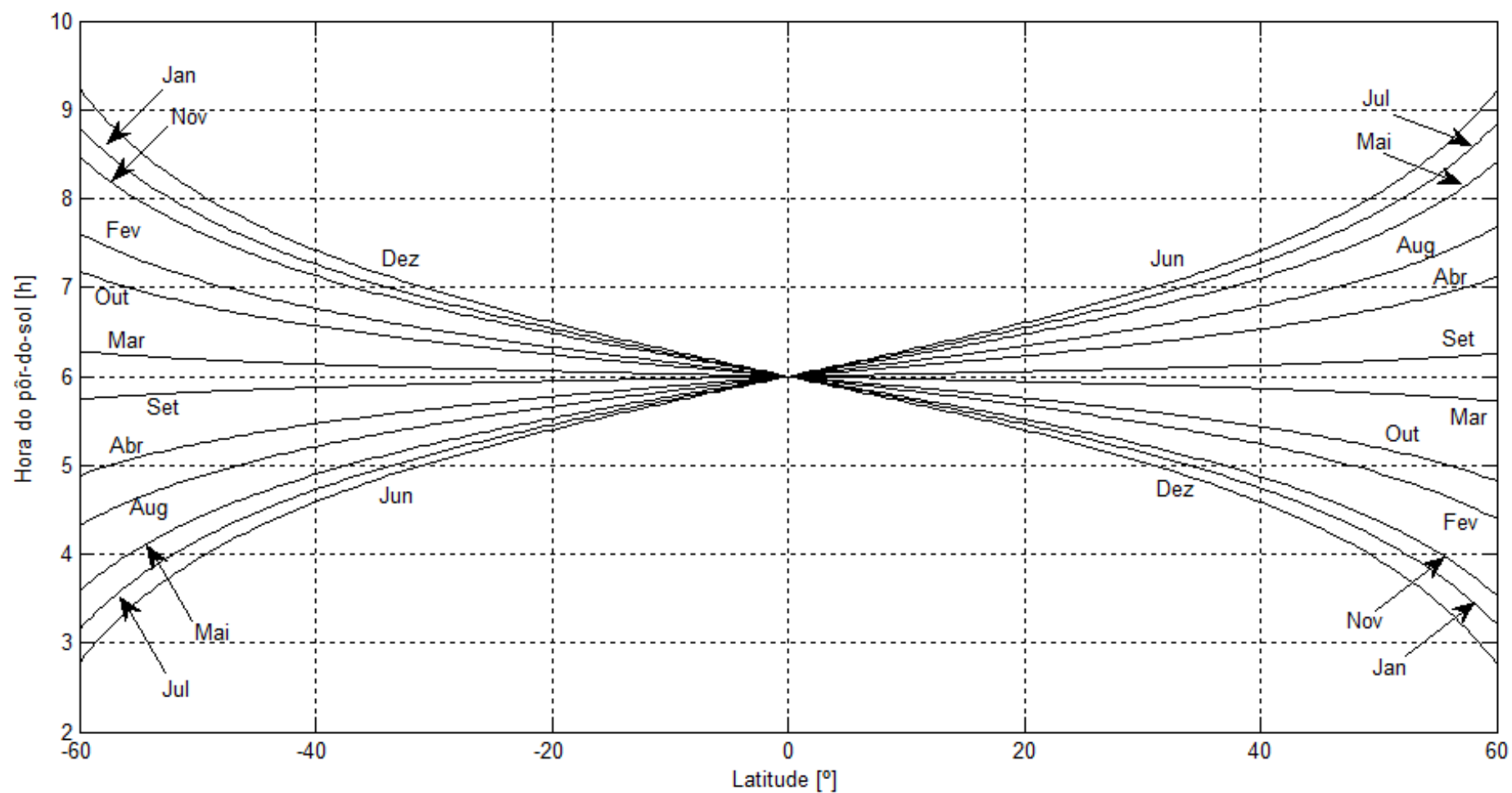
- [1] S. A. Kalogirou, *Solar Energy Engineering. Processes and Systems*, 2014.
- [2] *Futuro Energético*. [Filme]. Revolução Científica, 2010.
- [3] “Peak Oil. Info & Strategies.” [Online]. Available: <http://www.oildecline.com/>.
- [4] E. Comission, “World Energy Technology Outlook - 2050”.
- [5] DGEG, “Direção Geral da Energia e Geologia,” [Online]. Available: <http://www.dgeg.pt/>.
- [6] EUROSTAT. [Online]. Available: <http://ec.europa.eu/eurostat/tgm/refreshTableAction.do?tab=table&plugin=1&pcode=tsdpc320&language=en>.
- [7] J. Amador, “Produção e consumo de energia em Portugal: factos estilizados”.
- [8] J. A. Duffie e W. A. Beckman, *Solar Engineering of Thermal Processes*, 4th Edition, New Jersey, 2013.
- [9] F. Kreith e J. Kreider, *Principles of Solar Engineering*, New York: McGraw-Hill.
- [10] M. Collares-Pereira e M. J. Carvalho, *Dimensionamento de sistemas solares. Sistemas de aquecimento de água com armazenamento acoplado*, 1990.
- [11] M. Collares-Pereira e A. Rabl, “The average distribution of solar radiation - correlations between diffuse and hemispherical and between daily and hourly insolation values,” *Solar Energy*, vol. 22, pp. 155-164, 1979.
- [12] B. H. Y. Liu e R. C. Jordan, “The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation,” *Solar Energy*, vol. 4, pp. 1-19, 1960.
- [13] A. Whillier, *Solar energy collection and its utilization for house heating. Ph.D. Thesis, Mechanical Engineering*, M.I.T., Cambridge, 1953.
- [14] M. Collares-Pereira e A. Rabl, “Derivation of method for predicting long term average,” *Solar Energy*, vol. 23, pp. 223-233, 1979.
- [15] “Meteonorm,” [Online]. Available: www.meteonorm.com.
- [16] E. Luiz, F. Martins, E. Pereira e N. Schuch, “Determinação de um Ano Meteorológico Típico para Florianópolis”.
- [17] Guia para Instaladores de Coletores Solares.
- [18] P. Kovacs, “A guide to the standard EN 12975,” 2012.

Referências Bibliográficas

- [19] A. Rabl, *Active Solar Collectors and their Applications*, New York: Oxford University Press, 1985.
- [20] *Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE)*, 2006.
- [21] *Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação (REH)*, 2013.
- [22] C. Santos e L. Matias, *Coeficientes de Transmissão Térmica de Elementos da Envolvente dos Edifícios*, Lisboa, 2006.
- [23] *NP 1037-1. Ventilação e evacuação dos produtos da combustão dos locais com aparelho a gás. Parte 1: Edifícios de habitação. Ventilação natural*, 2002.
- [24] G. K. Pavlov e B. W. Olessen, "Seasonal Ground Solar Thermal Energy Storage –Review of Systems and Applications".
- [25] "SDH - Solar District Heating," [Online]. Available: <http://solar-district-heating.eu/ServicesTools/Plantdatabase.aspx>.
- [26] M. Collares-Pereira, J. M. Gordon, R. A. e Z. Y., "Design and Optimization of Solar Industrial Hot Water Systems with Storage," *Solar Energy*, vol. 32, nº 1, pp. 121-133, 1983.
- [27] M. Collares-Pereira, A. Joyce e P. Reis, "O valor e o custo da electricidade produzida por sistemas Solares (Levelised Cost of Electricity - LCOE, incentivos, política energética)," 2016.
- [28] SPES, *Instaladores de Equipamentos Solares Térmicos. Conversão Térmica da Energia Solar..*
- [29] R. Aguiar e M. J. Carvalho, "Manual de Instalação e Utilização do software SolTerm," 2012.

Anexos

Anexo 1 – Hora do pôr-do-sol com a variação da latitude $[-60^{\circ} 60^{\circ}]$ para todos os meses do ano.



Anexo 2 – Coeficientes de transmissão térmica linear. Valores de Ψ para pontes térmicas lineares.

2.1 Ligação da fachada com os pavimentos térreos

(a) – isolamento pelo interior

(b) – isolamento pelo exterior

(c) – Isolamento repartido

	<p>TABELA Ai – Valores de ψ [W/m.°C]</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">z [m]</th> <th colspan="3">e_p [m]</th> </tr> <tr> <th>0,15</th> <th>0,20</th> <th>$\geq 0,25$</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0 a +0,40</td> <td>0,50</td> <td>0,55</td> <td>0,65</td> </tr> <tr> <td>> +0,40</td> <td>0,65</td> <td>0,75</td> <td>0,85</td> </tr> </tbody> </table>	z [m]	e_p [m]			0,15	0,20	$\geq 0,25$	0 a +0,40	0,50	0,55	0,65	> +0,40	0,65	0,75	0,85		<p>TABELA Ae – Valores de ψ [W/m.°C]</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">z [m]</th> <th colspan="3">d [m]</th> </tr> <tr> <th>< 0</th> <th>de 0 a 0,60</th> <th>> 0,60</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0 a +0,40</td> <td>0,60</td> <td>0,30</td> <td>0,15</td> </tr> <tr> <td>> +0,40</td> <td>0,80</td> <td>0,45</td> <td>0,25</td> </tr> </tbody> </table>	z [m]	d [m]			< 0	de 0 a 0,60	> 0,60	0 a +0,40	0,60	0,30	0,15	> +0,40	0,80	0,45	0,25		<p>TABELA Ar – Valores de ψ [W/m.°C]</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">z [m]</th> <th colspan="3">e_p [m]</th> </tr> <tr> <th>0,15</th> <th>0,20</th> <th>$\geq 0,25$</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0 a +0,40</td> <td>0,45</td> <td>0,50</td> <td>0,60</td> </tr> <tr> <td>> +0,40</td> <td>0,60</td> <td>0,70</td> <td>0,80</td> </tr> </tbody> </table>	z [m]	e_p [m]			0,15	0,20	$\geq 0,25$	0 a +0,40	0,45	0,50	0,60	> +0,40	0,60	0,70	0,80
z [m]	e_p [m]																																																	
	0,15	0,20	$\geq 0,25$																																															
0 a +0,40	0,50	0,55	0,65																																															
> +0,40	0,65	0,75	0,85																																															
z [m]	d [m]																																																	
	< 0	de 0 a 0,60	> 0,60																																															
0 a +0,40	0,60	0,30	0,15																																															
> +0,40	0,80	0,45	0,25																																															
z [m]	e_p [m]																																																	
	0,15	0,20	$\geq 0,25$																																															
0 a +0,40	0,45	0,50	0,60																																															
> +0,40	0,60	0,70	0,80																																															

2.2 Ligação da fachada com pavimentos sobre locais não aquecidos

a) – isolamento pelo interior

	<p>TABELA Bi.1 – Valores de ψ [W/m.°C]</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="4">e_p [m]</th> </tr> <tr> <th>0,15</th> <th>0,20</th> <th>0,25</th> <th>$\geq 0,35$</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0,55</td> <td>0,65</td> <td>0,75</td> <td>0,85</td> </tr> </tbody> </table> <p>$0,15 \text{ m} < e_m^* < 0,30 \text{ m}$</p> <p>* Se não for em betão, a parede deve ter uma espessura superior a 0,22 m.</p>	e_p [m]				0,15	0,20	0,25	$\geq 0,35$	0,55	0,65	0,75	0,85		<p>TABELA Bi.2 – Valores de ψ [W/m.°C]</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="4">e_p [m]</th> </tr> <tr> <th>0,15</th> <th>0,20</th> <th>0,25</th> <th>$\geq 0,35$</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0,20</td> <td>0,25</td> <td>0,30</td> <td>0,35</td> </tr> </tbody> </table> <p>$0,15 \text{ m} < e_m^* < 0,30 \text{ m}$</p> <p>* Se não for em betão, a parede deve ter uma espessura superior a 0,22 m.</p>	e_p [m]				0,15	0,20	0,25	$\geq 0,35$	0,20	0,25	0,30	0,35
e_p [m]																											
0,15	0,20	0,25	$\geq 0,35$																								
0,55	0,65	0,75	0,85																								
e_p [m]																											
0,15	0,20	0,25	$\geq 0,35$																								
0,20	0,25	0,30	0,35																								

(b) – isolamento pelo exterior

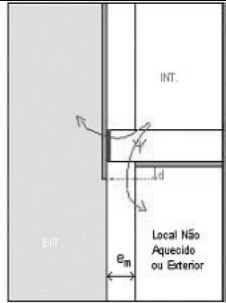


TABELA Be.1 – Valores de ψ [W/m. $^{\circ}$ C]

d [m]	e_m^* [m]			
	0,15	0,20	0,25	$\geq 0,35$
$0 < d \leq 0,30$	0,40	0,45	0,50	0,55

* Se não for em betão, a parede deve ter uma espessura superior a 0,22 m.

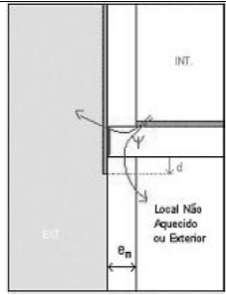


TABELA Be.2 – Valores de ψ [W/m. $^{\circ}$ C]

d [m]	e_m^* [m]			
	0,15	0,20	0,25	$\geq 0,35$
$0 \leq d \leq 0,30$	0,45	0,50	0,55	0,60

* Se não for em betão, a parede deve ter uma espessura superior a 0,22 m.

(c) – isolamento repartido

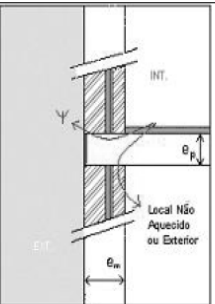


TABELA Br.1 – Valores de ψ [W/m. $^{\circ}$ C]

e_p [m]			
0,15	0,20	0,25	$\geq 0,35$
0,60	0,65	0,70	0,80

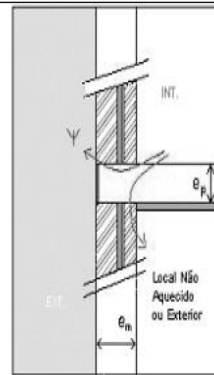


TABELA Br.2 – Valores de ψ [W/m. $^{\circ}$ C]

e_p [m]			
0,15	0,20	0,25	$\geq 0,35$
0,50	0,55	0,60	0,70

2.3 Ligação da fachada com pavimentos intermédios

(a) – isolamento pelo interior

(b) – isolamento pelo exterior

(c) – isolamento repartido

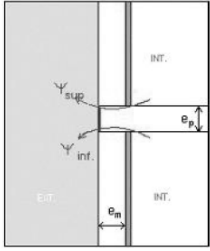


TABELA Ci – Valores de ψ_{sup} e ψ_{inf} [W/m. $^{\circ}$ C]

e_m^* [m]	e_p [m]			
	0,15	0,20	0,25	$\geq 0,35$
0,15 a 0,22	0,35	0,40	0,45	0,55
0,22 a 0,30	0,30	0,35	0,40	0,50
$\geq 0,30$	0,25	0,30	0,35	0,45

* Se não for em betão, a parede deve ter uma espessura superior a 0,22 m.

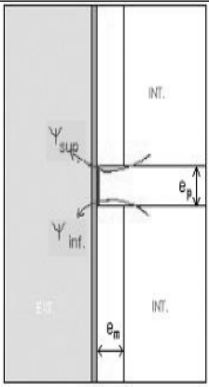


Tabela Ce

$\psi_{sup} = \psi_{inf} = 0,10$ W/m. $^{\circ}$ C

$0,15 \text{ m} < e_m^* < 0,30 \text{ m}$

* Se não for em betão, a parede deve ter uma espessura superior a 0,22 m.

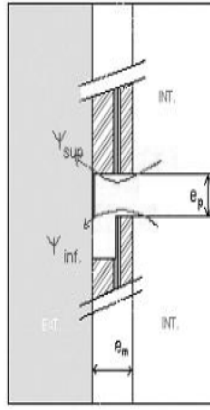


TABELA Cr – Valores de ψ_{sup} e ψ_{inf} [W/m. $^{\circ}$ C]

e_m^* [m]	e_p [m]			
	0,15	0,20	0,25	$\geq 0,35$
$\geq 0,30$	0,15	0,20	0,25	0,30

* Se não for em betão, a parede deve ter uma espessura superior a 0,22 m

2.5 Ligação da fachada com cobertura inclinada ou terraço

(a) – isolamento pelo interior

(b) – isolamento contínuo pelo exterior

(c) – isolamento repartido

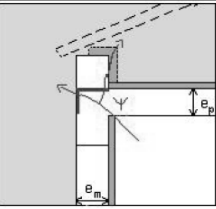


TABELA Di. – Valores de ψ [W/m. $^{\circ}$ C]

e_p [m]			
0,15	0,20	0,25	$\geq 0,35$
0,65	0,75	0,85	0,90

$0,15 \text{ m} < e_m^* < 0,30 \text{ m}$

* Se não for em betão, a parede deve ter uma espessura superior a 0,22 m

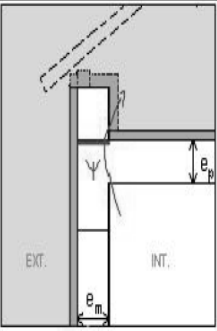


TABELA De. – Valores de ψ [W/m. $^{\circ}$ C]

e_p [m]			
0,15	0,20	0,25	$\geq 0,35$
0,35	0,45	0,50	0,55

$0,15 \text{ m} < e_m^* < 0,30 \text{ m}$

* Se não for em betão, a parede deve ter uma espessura superior a 0,22 m.

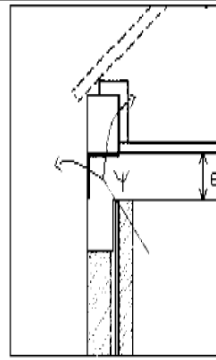


TABELA Dr. – Valores de ψ [W/m. $^{\circ}$ C]

e_p [m]			
0,15	0,20	0,25	$\geq 0,35$
0,50	0,60	0,70	0,75

2.6 Ligação da fachada com a varanda

(a) – isolamento pelo interior (b) – isolamento pelo exterior (c) – isolamento repartido (d) – valores de Ψ

			e_p [m]				
			0,15	0,20	0,25	$\geq 0,35$	
			*0,15 a 0,22	0,40	0,45	0,50	0,55
			0,22 a 0,30	0,35	0,40	0,45	0,50
$\geq 0,30$	0,30	0,35	0,40	0,45			

2.7 Ligação entre duas paredes verticais

(a) – isolamento pelo interior

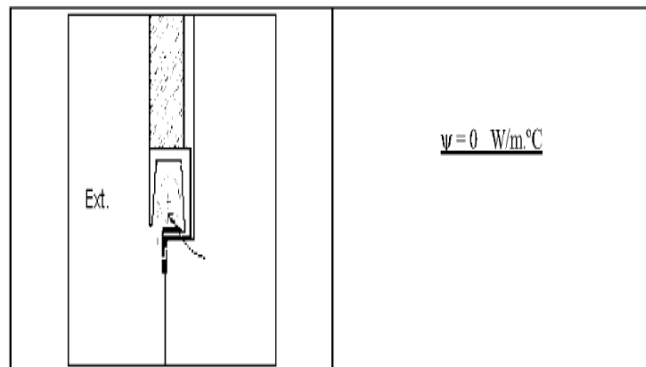
(b) – isolamento pelo exterior

(c) – isolamento repartido

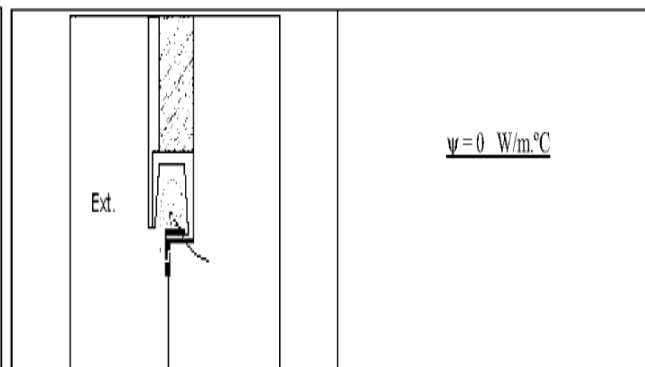
	<p>TABELA Fi – Valores de ψ [W/m.$^{\circ}$C]</p> <table border="1"> <tr> <td colspan="2">e_m^* [m]</td> </tr> <tr> <td>$\leq 0,22$</td> <td>$\geq 0,22$</td> </tr> <tr> <td>0,20</td> <td>0,25</td> </tr> </table> <p>* Se não for em betão, a parede deve ter uma espessura superior a 0,22 m.</p>	e_m^* [m]		$\leq 0,22$	$\geq 0,22$	0,20	0,25		<p>TABELA Fe – Valores de ψ [W/m.$^{\circ}$C]</p> <table border="1"> <tr> <td colspan="2">e_m^* [m]</td> </tr> <tr> <td>$\leq 0,22$</td> <td>$\geq 0,22$</td> </tr> <tr> <td>0,10</td> <td>0,15</td> </tr> </table> <p>* Se não for em betão, a parede deve ter uma espessura superior a 0,22 m.</p>	e_m^* [m]		$\leq 0,22$	$\geq 0,22$	0,10	0,15		<p>TABELA Fr – Valores de ψ [W/m.$^{\circ}$C]</p> <table border="1"> <tr> <td>e_m^* [m]</td> </tr> <tr> <td>$\geq 0,22$</td> </tr> <tr> <td>0,20</td> </tr> </table> <p>* Se não for em betão, a parede deve ter uma espessura superior a 0,22 m.</p>	e_m^* [m]	$\geq 0,22$	0,20
e_m^* [m]																				
$\leq 0,22$	$\geq 0,22$																			
0,20	0,25																			
e_m^* [m]																				
$\leq 0,22$	$\geq 0,22$																			
0,10	0,15																			
e_m^* [m]																				
$\geq 0,22$																				
0,20																				

2.8 Ligação da fachada com caixa de estore

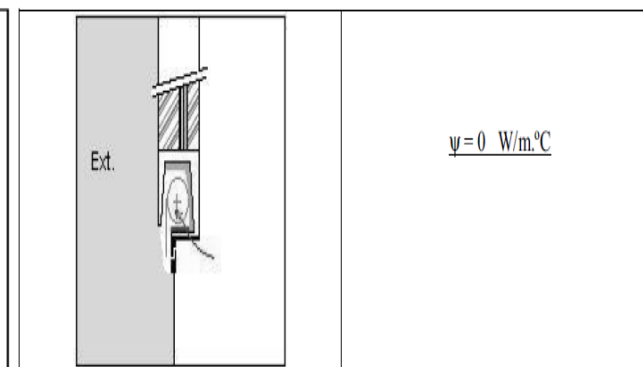
(a) – isolamento pelo interior



(b) – isolamento pelo exterior

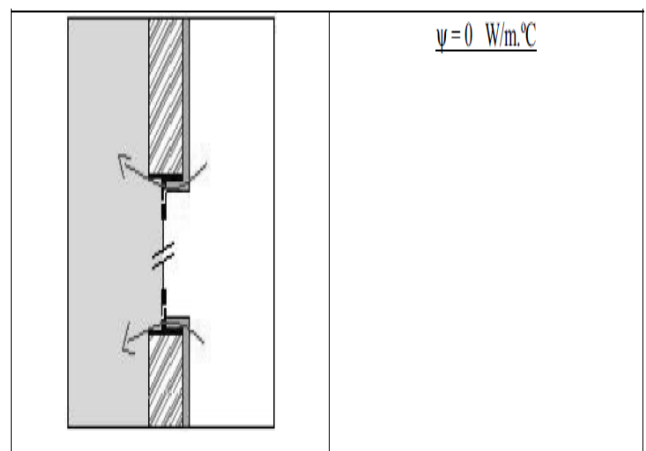


(c) – isolamento repartido

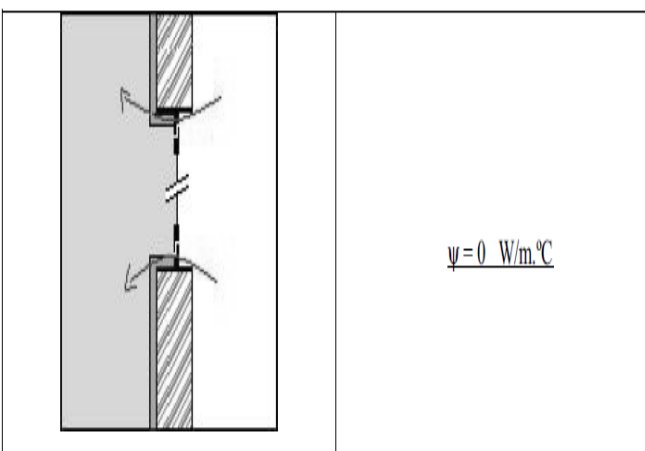


2.9 Ligação da fachada / padieira ou peitoral

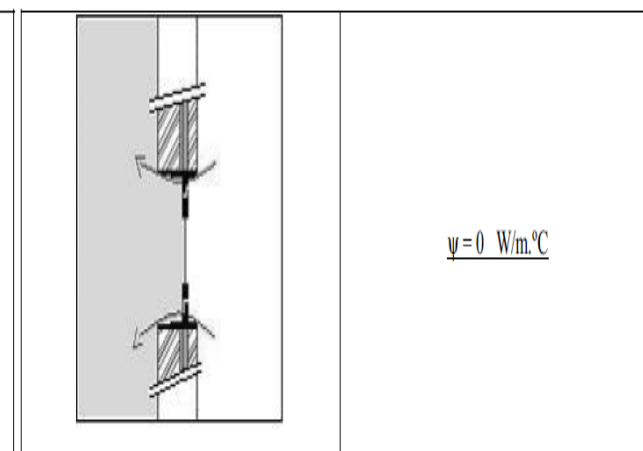
(a) – isolamento interior



(b) – isolamento pelo exterior



(c) – isolamento repartido

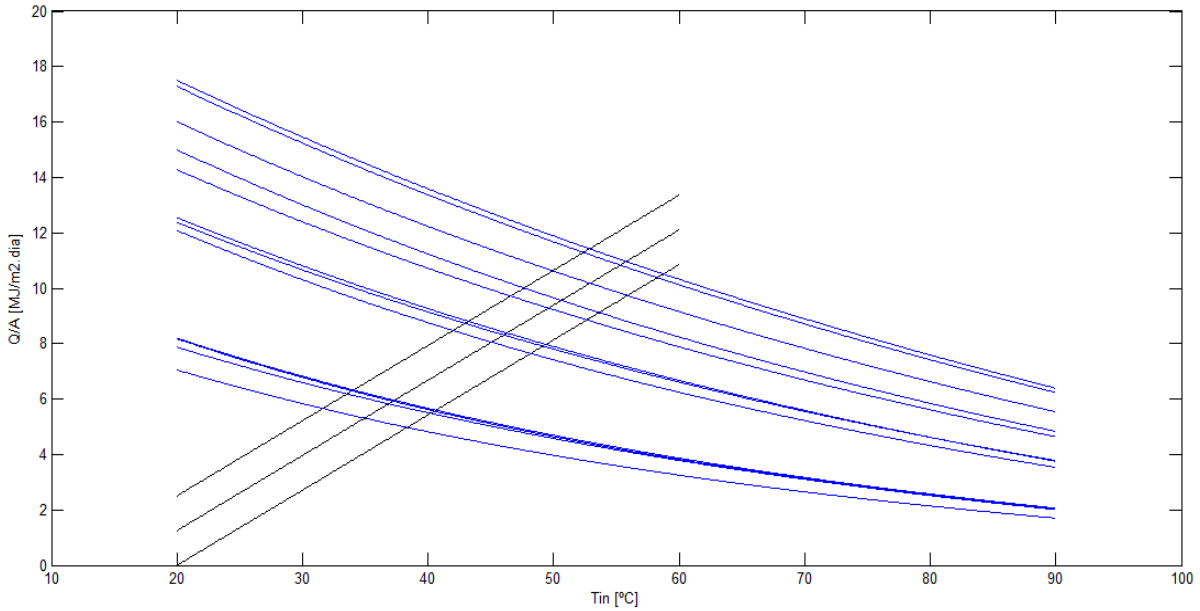


Anexo 3 – Valores do fator solar dos envidraçados.

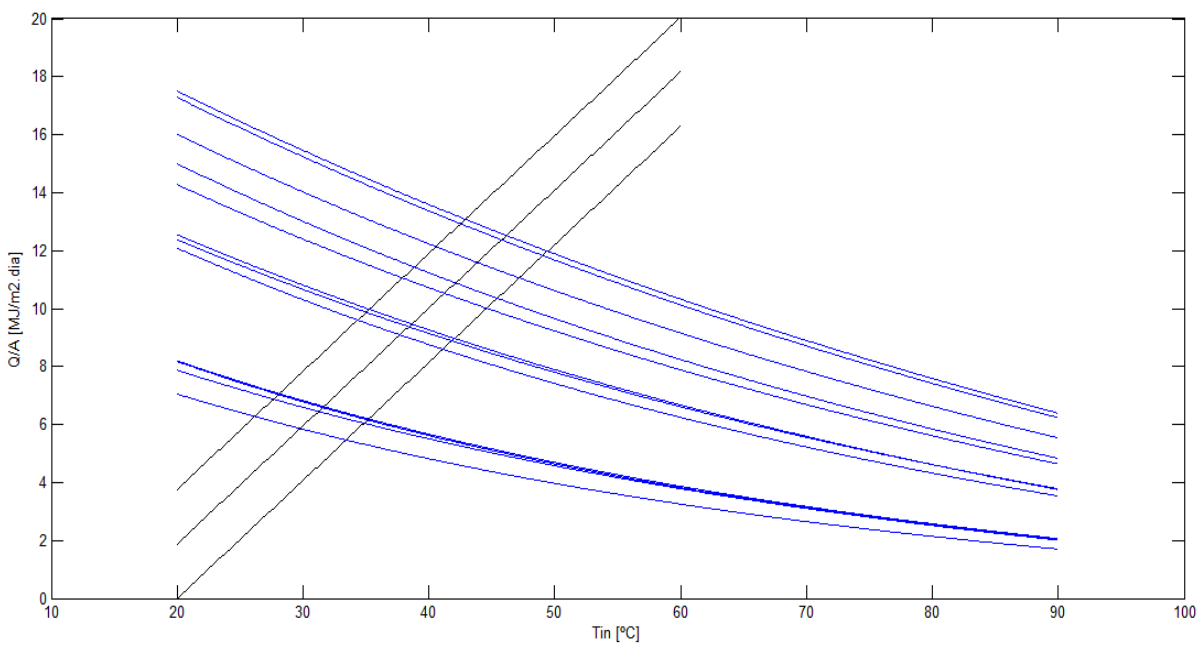
Tipo	Fator solar	Tipo	Fator solar
<u>Vidro Simples:</u>		<u>Vidro Duplo:</u>	
Incolor:		Incolor + Incolor:	
4 mm	0,88	(4 a 8) mm + 4 mm	0,78
5 mm	0,87	(4 a 8) mm + 5 mm	0,75
6 mm	0,85	Colorido na massa + incolor:	
8 mm	0,82	4 mm + (4 a 8) mm	0,6
Colorido na massa:		5 mm + (4 a 8) mm	0,55
4 mm	0,7	6 mm + (4 a 8) mm	0,5
5 mm	0,65	8 mm + (4 a 8) mm	0,45
6 mm	0,6	Refletante incolor + incolor:	
8 mm	0,55	(4 a 8) mm + (4 a 8) mm	0,52
Refletante incolor:		Refletante colorido na massa + incolor:	
De 4 mm a 8 mm	0,6	(4 a 5) mm + (4 a 8) mm	0,4
Refletante colorido na massa:		(6 a 8) mm + (4 a 8) mm	0,35
De 4 mm a 5 mm	0,5	Tijolo de vidro (incolor e sem relevos)	
De 6 mm a 8 mm	0,45	0,57	

Anexo 4 – Retas de carga para diferentes relações de volume do acumulador e área de coletores

1. Reta de carga para a relação 60 l/m² de coletor.

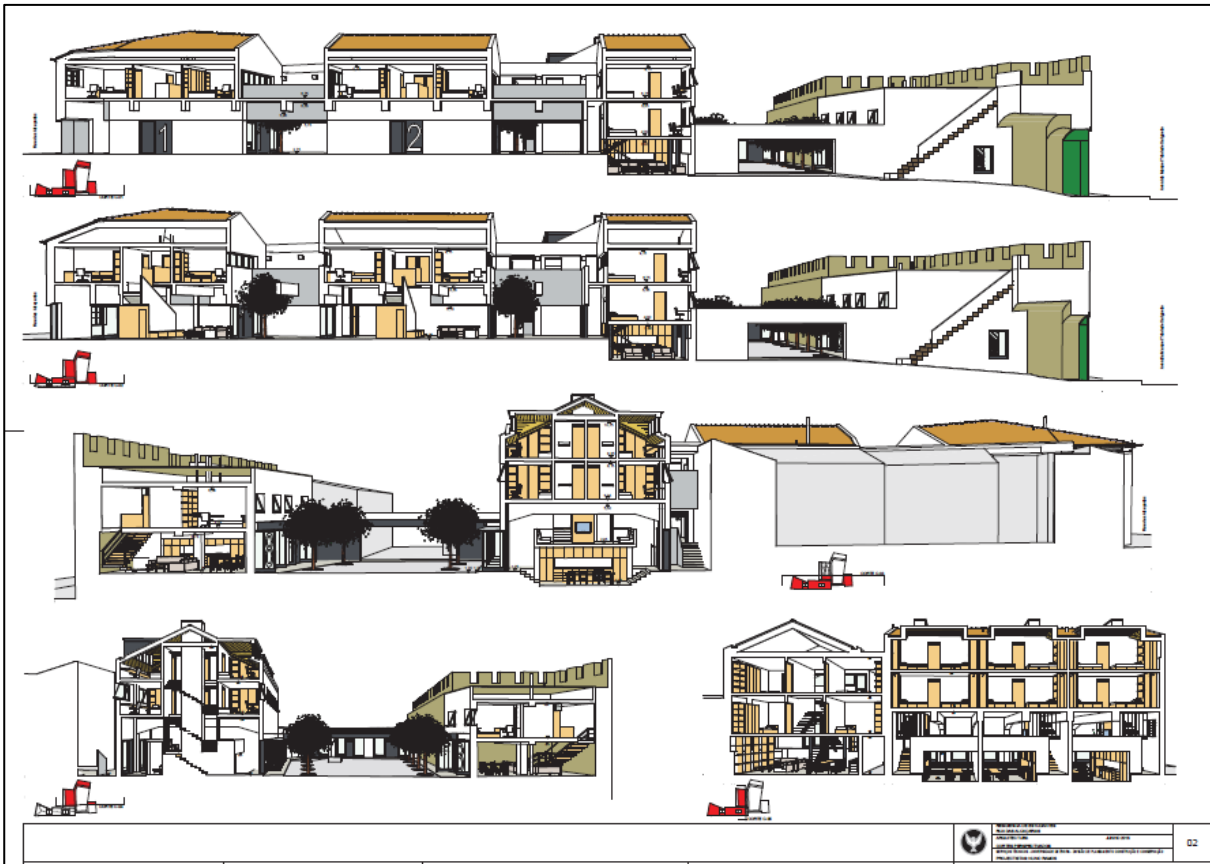


2. Reta de carga para a relação 90 l/m² de coletor.



Anexo 5

a) – Cortes e perspectivas da estrutura arquitetónica analisada.



b) – Dados técnicos referentes à cobertura e às paredes exteriores

Cobertura:

Cobertura					
	Fração	Comprimento [m]	Largura [m]	Área total [m ²]	Perímetro total [m]
Área da Cobertura	1	12	9	108	
	2	11,4	8,3	94,62	
	3	10,2	6,1	62,22	
	4	18	9,5	171	
	5	11,7	8,8	102,96	
Total				538,8	
Perímetro da Cobertura	1	12,0*2	9,0*2		42
	2	11,4*2	8,3*2		39,4
	3	10,2*2	6,1*2		32,6
	4	18,0*2	9,5*2		55
	5	11,7*2	8,8*2		41
Total					210

Paredes exteriores:

Alçada Sul				
	Comprimento [m]	Largura [m]	Altura [m]	Área total [m ²]
Paramento 0	8,73		2,48	21,65
Paramento 1		Somatório		100,16
Paramento 2		Somatório		107,36
Paramento 3		Somatório		11,04
Janelas e Portas		Somatório		8,76
Alvenaria				231,45

Alçada Norte				
	Comprimento [m]	Largura [m]	Altura [m]	Área total [m2]
Paramento 0	7,8		2,48	19,34
Paramento 1		Somatório		46,68
Paramento 2	10		2,4	24,00
Paramento 3		Somatório		11,04
Janelas e Portas		Somatório		4,74
Alvenaria				96,32

Alçada Este				
	Comprimento [m]	Largura [m]	Altura [m]	Área total [m2]
Paramento 0		Somatório		95,07
Paramento 1		Somatório		147,96
Paramento 2		Somatório		136,08
Paramento 3				0,00
Janelas e Portas		Somatório		96,33
Alvenaria				282,78

Alçada Oeste				
	Comprimento [m]	Largura [m]	Altura [m]	Área total [m2]
Paramento 0		Somatório		76,21
Paramento 1		Somatório		151,06
Paramento 2		Somatório		139,80
Paramento 3				0,00
Janelas e Portas		Somatório		114,43
Alvenaria				252,64

c) - Coeficientes de Transmissão Térmica

Cobertura (Fração 1 e 2)				
Constituição	e (m)	λ (W/m.°C)	R (m2. °C / W)	Referências
Laje de betão normal	0,5	1,65	0,30	
Isolamento térmico (EPS)	0,1	0,04	2,5	ITE 50,
Reboco	0,015	1,3	0,01	LNEC
Telha lusa	0,015	0,5	0,03	
Rse + Rsi			0,2	
Total	0,63		3,04	
			U = 1/R	0,33

Cobertura (Fração 3, 4 e 5)				
Constituição	e (m)	λ (W/m.°C)	R (m2. °C / W)	Referências
Laje de betão normal	0,3	1,65	0,18	
Isolamento térmico (EPS)	0,1	0,04	2,5	ITE 50,
Reboco	0,015	1,3	0,01	LNEC
Telha lusa	0,015	0,5	0,03	
Rse + Rsi			0,2	
Total	0,43		2,92	
			U = 1/R	0,34

Paredes exteriores (Fração 1, 2, 3 e 4)				
Constituição	e (m)	λ (W/m.°C)	R (m2. °C / W)	Referências
Reboco interior	0,015	1,3	0,01	
Parede dupla - Tijolo furado	0,3		0,96	
Reboco exterior	0,015	1,3	0,01	ITE 50,
Isolamento térmico (EPS)	0,1	0,04	2,50	LNEC
Rse + Rsi			0,17	
Total	0,43		3,65	
			U = 1/R	0,27

Paredes exteriores (Fração 5)				
Constituição	e (m)	λ (W/m.°C)	R (m2. °C / W)	Referências
Reboco interior	0,015	1,3	0,01	
Parede dupla - Tijolo furado	0,3		0,96	
Reboco exterior	0,015	1,3	0,01	ITE 50,
Isolamento térmico (EPS)	0,1	0,04	2,50	LNEC
Rse + Rsi			0,17	
Muralha	1	2,8	0,36	
Total	1,43		4,01	
			U = 1/R	0,25

d) – Perdas associadas à renovação de ar

Área útil do pavimento (Ap)	1459,35	m^2
Volume interior (V)	4120,0	m^3

Ventilação Natural					
Cumpre NP 1037-17	(S ou N)?	<input type="text" value="N"/>			
Caso sim	Rph =	<input type="text" value="0,6"/>			
Caso não	(Ver no Quadro IV.1)	<table border="1"> <tr> <td>Taxa de Renovação Nominal</td> <td>Rph =</td> <td><input type="text" value="0,65"/></td> </tr> </table>	Taxa de Renovação Nominal	Rph =	<input type="text" value="0,65"/>
Taxa de Renovação Nominal	Rph =	<input type="text" value="0,65"/>			
Volume interior	<input type="text" value="4120,0"/>	m^3			
	x				
Taxa de Renovação Nominal	<input type="text" value="0,65"/>	R_{ph}			
	x				
	<input type="text" value="0,34"/>				
	=				
Total	<input type="text" value="910,53"/>	$W / ^\circ C$			

Perdas associadas à renovação de ar = 910,53 W/ °C.

e) – Ganhos térmicos úteis na estação de aquecimento

Orientação dos vãos envidraçados	Tipo	Área	Fator de orientação X_j	Fator solar g_s	Fator de obstrução $F_s=F_h.F_o.F_f$	Fração envidraçada F_g	Fator de seleção F_w	Área efetiva
N - sem obstáculo	Vidro Duplo	4,74	0,27	0,63	1	0,7	0,9	0,5
	Vidro Duplo	3,00	1	0,63	1	0,7	0,9	1,2
S - sem obstáculo	Vidro Duplo	5,76	1	0,63	0	0,7	0,9	0,0
	Vidro Duplo	63,83	0,56	0,63	1	0,7	0,9	14,2
E - sem obstáculo	Vidro Duplo	15,84	0,56	0,63	0	0,7	0,9	0,0
	Vidro Duplo	16,66	0,56	0,63	0,84	0,7	0,9	3,1
E - totalmente sombreado	Vidro Duplo	35,97	0,56	0,63	1	0,7	0,9	8,0
	Vidro Duplo	51,37	0,56	0,63	0	0,7	0,9	0,0
E - parcialmente sombreado	Vidro Duplo	27,08	0,56	0,63	0,84	0,7	0,9	5,1
	Vidro Duplo							
W - sem obstáculo								
W - totalmente sombreado								
W - parcialmente sombreado								
Total		224,3						32,0

f) – Necessidades anuais de aquecimento e o valor máximo admissível.

Graus-Dia do local 1390

Áreas	
Paredes exteriores	863,19
Coberturas exteriores	538,8
Pavimentos exteriores	0
Envidraçados exteriores	224,26
Paredes interiores	141,84
Área total	1768,08
Volume	4120
FF	0,43

$N_i = 4,5 + 0,0395 \text{ GD}$	para $FF < 0,5$
$N_i = 4,5 + (0,021 + 0,037 \text{ FF}) \text{ GD}$	para $0,5 < FF < 1$
$N_i = [4,5 + (0,021 + 0,037 \text{ FF}) \text{ GD}] (1,2 - 0,2 \text{ FF})$	para $1 < FF < 1,5$
$N_i = 4,05 + 0,06885 \text{ GD}$	para $FF > 1,5$

$$N_i = 4,5 + 0,0395 * 1390 \leftrightarrow N_i = 59,4 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{ano.}$$

Cálculo do indicador Nic	
Perdas térmicas associadas a:	(W/°C)
Envolvente exterior	756,8
Envolvente interior	23,3
Vãos Envidraçados	448,5
Renovação de Ar	910,5

Coeficiente global de perdas	2139,11	W / °C
	x	
GD do local	1390	
	x	
	0,024	
	=	
Nec. Brutas de aquecimento	71360,55	kWh/ano
	-	
Ganhos totais úteis	41345,92	kWh/ano
	=	
Nec. de aquecimento	30014,64	kWh/ano
	/	
Área útil do Pavimento	1459,35	m ²
	=	
Nec. Nom. De aquecimento (Nic)	20,6	kWh/m². ano
	<	kWh/m². ano
Nec. Nominais de aquecimento Max. (Ni)	59	

Anexo 6 – Coeficiente de transmissão térmica do depósito, para diferentes espessuras de isolamento térmico (EPS).

EPS [m]	λ [W/m.°C]	R [m ² .°C/W]	U [W/m ² .°C]
0,05	0,045	1,111	0,900
0,1	0,045	2,222	0,450
0,15	0,045	3,333	0,300
0,2	0,045	4,444	0,225
0,25	0,045	5,556	0,180
0,3	0,045	6,667	0,150
0,35	0,045	7,778	0,129
0,4	0,045	8,889	0,113
0,45	0,045	10,000	0,100
0,5	0,045	11,111	0,090