



ESTUDO DA APLICAÇÃO E DESEMPENHO DE UM SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO POR ABSORÇÃO LIBR/H₂O, COM RECURSO À ENERGIA SOLAR

DANIELA EDUARDA MIRANDA PEREIRA

novembro de 2020

ESTUDO DA APLICAÇÃO E DESEMPENHO DE UM SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO POR ABSORÇÃO LiBr/H₂O, COM RECURSO À ENERGIA SOLAR

Daniela Eduarda Miranda Pereira

1150055

2020

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica



POLITÉCNICO
DO PORTO

isep

ESTUDO DA APLICAÇÃO E DESEMPENHO DE UM SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO POR ABSORÇÃO LiBr/H₂O, COM RECURSO À ENERGIA SOLAR

Daniela Eduarda Miranda Pereira

1150055

Dissertação apresentada ao Instituto Superior de Engenharia do Porto para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação de Leonardo José da Silva Ribeiro.

2020

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica



POLITÉCNICO
DO PORTO

isep

JÚRI

Presidente

Doutoramento, Ana Maria Raposo João

Professor Adjunto, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Orientador

Doutoramento, Leonardo José da Silva Ribeiro

Professor Adjunto, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Arguente

Doutoramento, Adélio Cavadas

Professor Adjunto, Instituto Superior de Viana do Castelo

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos aqueles que de forma direta ou indireta tornaram possível a concretização deste trabalho, particularmente ao Professor Leonardo Ribeiro, meu orientador, pela sua disponibilidade ao longo do trabalho e sugestões na elaboração do mesmo, assim como lhe devo pela apresentação deste tema.

À empresa/equipa STEG, por toda a ajuda em equipa e total disponibilidade que sempre dispuseram apoiando-me em tudo o que lhes foi facultado ao longo do estágio e consequente integração na equipa de trabalho. O meu muito obrigado ao Engenheiro Rui Pereira e ao Engenheiro João Mendes pela oportunidade que me deram.

Deixo também o meu agradecimento à minha família, namorado e amigos, pois o apoio deles foi fundamental nesta etapa.

PALAVRAS CHAVE

Energia solar, sistema de refrigeração, gerador, condensador, fração solar, painel solar térmico.

RESUMO

As tecnologias com fonte em energia solar representam uma fonte de energia limpa, renovável, essenciais para um futuro energético mais sustentável. Este trabalho apresenta o estudo da aplicação e desempenho de um sistema de refrigeração por absorção LiBr/H₂O, com recurso à energia solar tendo por base algumas cidades portuguesas (Bragança, Castelo Branco, Évora, Faro, Lisboa, Porto e Viana do Castelo). Para este estudo foi fundamental analisar o ciclo em questão e perceber o impacto que a variação de temperatura do gerador e condensador tem sobre a eficiência do ciclo. Tratando-se de um sistema com recurso à energia solar, foi necessário calcular a irradiação recebida pelo painel solar térmico para posterior aplicação do método da fração solar.

KEYWORDS

Solar energy, cooling system, generator, condenser, solar fraction, thermal solar panel.

ABSTRACT

Technologies based on solar energy represent a clean, renewable energy source, essential for a more sustainable energy future. This work presents the study of the application and performance of a LiBr / H₂O absorption refrigeration system, using solar energy based on some Portuguese cities (Bragança, Castelo Branco, Évora, Faro, Lisboa, Porto and Viana do Castelo). For this study it was essential to analyze the cycle in question and understand the impact that the temperature variation of the generator and condenser has on the efficiency of the cycle. In the case of a system using solar energy, it was necessary to calculate the radiation received by the solar thermal panel for later application of the solar fraction method.

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

Lista de Abreviaturas

ASDC	<i>Atmospheric Science Data Center</i>
CO ₂	Dióxido de carbono
COP	<i>Coefficient Of Performance</i> - coeficiente de desempenho
H ₂ O	Água
IEA	International Energy Agency
IVA	Imposto de valor agravado
LiBr	Brometo de Lítio
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i> - Administração Nacional da Aeronáutica e Espaço
NH ₃	Amoníaco
O ₂	Oxigênio
O ₃	Ozono
PRI	Prazo de retorno do investimento
SMC	Sheet Molding Compound - materiais feitos à base de resina poliéster
VCRS	<i>Vapor-Compression Refrigeration System</i> – Sistema de refrigeração por compressão a vapor

Lista de Unidades

€	Euro
°C	Grau Celsius
°	Grau
J	Joule
K	Kelvin
L	Litro
m	Metro
min	Minuto
kg	Quilograma
kWh	Quilowatt-hora
s	Segundo
W	Watt

GLOSSÁRIO DE TERMOS

Termo	Designação	Unidade
a_1	Parâmetro de perda de calor	W/(m ² .K)
A_c	Área do coletor	m ²
C_p	Calor específico	J/(kg.K)
CT_m	Cargas térmicas mensais	kWh
f	Fração solar	-
F'	Fator de eficiência do coletor	-
F_R	Fator de remoção de calor do coletor	-
F'_R	Fator de remoção de calor modificado	-
G	Radiação global média diária mensal	J/(m ² .dia)
h	Entalpia	-
H_s	Ângulo solar	°
H_a	Altura angular	°
H_{ss}	Ângulo solar do pôr do sol	°
I	Intensidade de irradiação de uma superfície	J/(m ² .dia)
K_T	Índice de claridade	-
\dot{m}	Caudal mássico	(kg/s)
m_f	Fluxo mássico	(kg/s/m ²)
n	Número do dia do ano	dia

n_m	Número de dias do mês	-
\dot{Q}	Potência	W
\dot{Q}_E	Potência do evaporador	W
\dot{Q}_G	Potência do gerador	W
Q_p	Perda total do painel solar	W
R_{DIF}	Radiação difusa que chega a uma superfície pousada na Terra	J/(m ² .dia)
R_{DIR}	Radiação direta que chega a uma superfície pousada na Terra	J/(m ² .dia)
R_A	Radiação por albedo que chega a uma superfície pousada na Terra	J/(m ² .dia)
S	Radiação que chega à uma superfície horizontal no exterior da atmosfera a qualquer tempo	W/m ²
S_0	Constante solar	W/m ²
S_D	Radiação diária que chega à uma superfície horizontal do exterior da atmosfera	J/m ²
S_n	Radiação que chega ao exterior da atmosfera	W/m ²
T	Temperatura	K ou °C
T_a	Temperatura ambiente média mensal	K ou °C
T_{abs}	Temperatura da placa absorvedora	°C
U_a	Coeficiente de perdas de calor no sentido superior	W/(m ² .°C)
U_d	coeficiente de perdas de calor no sentido inferior	W/(m ² .°C)
U_L	Coeficiente global de perdas de calor no coletor	W/(m ² .°C)

U_o	Coeficiente de perdas de calor das bordas	$W/(m^2 \cdot ^\circ C)$
x	Concentração em LiBr (Brometo de Lítio) na solução	-
X	Parâmetro do método da fração solar	-
Y	Parâmetro do método da fração solar	-
Δt	Total de segundos do mês	s

Símbolos gregos

Termo	Designação	Unidade
α	Coeficiente de absorção	-
α_s	Altura solar	$^\circ$
β	Ângulo de inclinação	$^\circ$
γ	Azimute	$^\circ$
δ	Declinação	$^\circ$
θ	Ângulo de incidência	$^\circ$
θ_s	Zênite	-
λ	Longitude	$^\circ$
ρ	Coeficiente de reflexão total hemisférica	-
τ	Coeficiente de transmissão	-
φ	Latitude	$^\circ$

Sobre-índice

Termo	Designação	Unidade
d	Diário médio	-
dm	Diário médio mesnal	-

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1 - ESQUEMA GERAL DE UM SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO POR ABSORÇÃO DE SIMPLES EFEITO. FONTE: (NIKBAKHTI, ET AL., 2020) - ADAPTADA.	39
FIGURA 2 - REPRESENTAÇÃO DO CICLO DE REFRIGERAÇÃO POR ABSORÇÃO. FONTE: AUTORIA PRÓPRIA.	39
FIGURA 3 - DIAGRAMA TEMPERATURA-PRESSÃO-CONCENTRAÇÃO DA SOLUÇÃO LiBr/H ₂ O. FONTE: STOECKER (1985).	41
FIGURA 4 - ENTALPIA DA SOLUÇÃO LiBr/H ₂ O. FONTE: STOECKER (1985).	42
FIGURA 5 - MOVIMENTO DA TERRA EM TORNO DO SOL. FONTE: (FOSTER, ET AL., 2009) – ADAPTADA. .	44
FIGURA 6 - SISTEMA DE COORDENADAS TERRESTRE. FONTE: (FOSTER, ET AL., 2009) – ADAPTADA.	45
FIGURA 7 - POSIÇÃO DO SOL RELATIVAMENTE AOS ÂNGULOS SOLARES. FONTE: (KALOGIROU, 2009) – ADAPTADA.	45
FIGURA 8 - DECLINAÇÃO SOLAR AO LONGO DE UM ANO. FONTE: (KALOGIROU, 2009) – ADAPTADA.	47
FIGURA 9 - CURVAS DO ESPETRO DE EMISSÃO DA RADIAÇÃO SOLAR. FONTE: (VARDAVAS, ET AL., 2006) - ADAPTADA.	49
FIGURA 10 - COMPONENTES DE UM PAINEL SOLAR PLANO. FONTE: RORIZ (2010) – ADAPTADA.	54
FIGURA 11 - COEFICIENTE DE TRANSMISSÃO E COEFICIENTE DE ABSORÇÃO EM FUNÇÃO DO ÂNGULO DE INCIDÊNCIA. FONTE: (DUFFIE, ET AL., 2013) - ADAPTADA.....	56
FIGURA 12 - ÂNGULO DE INCIDÊNCIA MÉDIO MENSAL. FONTE: (DUFFIE, ET AL., 2013).	57
FIGURA 13 - ESQUEMA DE UM SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO SOLAR. FONTE (RORIZ, ET AL., 2010) – ADAPTADA.	59
FIGURA 14 - FRAÇÃO SOLAR (F) EM FUNÇÃO DOS PARÂMETROS ADIMENSIONAIS X E Y. FONTE (DUFFIE, ET AL., 2013) – ADAPTADA.....	63
FIGURA 15 - VALORES MÉDIOS DIÁRIOS MENSIS OBTIDOS PARA O ÂNGULO HORÁRIO DO PÔR DO SOL PARA CADA CIDADE. DADOS DO ANEXO 6.1.	70
FIGURA 16 - RADIAÇÃO MÉDIA DIÁRIA MENSAL INCIDENTE NUMA SUPERFÍCIE PLANA EM CADA CIDADE. DADOS DO ANEXO 6.1.	71
FIGURA 17 - RADIAÇÃO GLOBAL DIÁRIA MÉDIA MENSAL INCIDENTE EM SUPERFÍCIES PLANAS PARA CADA CIDADE.	72

FIGURA 18 - ESQUEMA DE UM SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO SOLAR COM A MARCAÇÃO DOS PONTOS DO CICLO. FONTE: AUTORIA PRÓPRIA.	89
FIGURA 19 - OBTENÇÃO DAS PROPRIEDADES DA SOLUÇÃO AQUOSA DE LIBR.	90
FIGURA 20 - OBTENÇÃO DAS PROPRIEDADES DA SOLUÇÃO AQUOSA DE LIBR.	90
FIGURA 21 - DESEMPENHO DO SISTEMA EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA DO GERADOR.	92
FIGURA 22 - DESEMPENHO DO SISTEMA EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA DO GERADOR E ABSORVEDOR.	93
FIGURA 23 - DESEMPENHO DO SISTEMA EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA DO GERADOR E CONDENSADOR.	95
FIGURA 24 - DESEMPENHO DO SISTEMA EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA DO GERADOR E CONDENSADOR.	96
FIGURA 25 - FRAÇÃO SOLAR EM FUNÇÃO DO NÚMERO DE PAINÉIS PARA BRAGANÇA.	99
FIGURA 26 - FRAÇÃO SOLAR EM FUNÇÃO DO NÚMERO DE PAINÉIS PARA CASTELO BRANCO.	100
FIGURA 27 - FRAÇÃO SOLAR EM FUNÇÃO DO NÚMERO DE PAINÉIS PARA ÉVORA.	102
FIGURA 28 - FRAÇÃO SOLAR EM FUNÇÃO DO NÚMERO DE PAINÉIS PARA FARO.	103
FIGURA 29 - FRAÇÃO SOLAR EM FUNÇÃO DO NÚMERO DE PAINÉIS PARA LISBOA.	105
FIGURA 30 - FRAÇÃO SOLAR EM FUNÇÃO DO NÚMERO DE PAINÉIS PARA PORTO.	106
FIGURA 31 - FRAÇÃO SOLAR EM FUNÇÃO DO NÚMERO DE PAINÉIS PARA VIANA DO CASTELO.	108
FIGURA 32 - SISTEMA ESCOLHIDO E PREÇO ATRIBUÍDO. FONTE: VULCANO - BOSCH TERMOTECNOLOGIA, S.A. (2017) – ADAPTADA.	110

ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 1 - COORDENADAS GEOGRÁFICAS DAS CIDADES EM ESTUDO.	46
TABELA 2 - MÉDIA DE DIAS RECOMENDADO PARA CADA MÊS.....	47
TABELA 3 - ÍNDICES DE CLARIDADE PARA AS CIDADES EM ESTUDO.	51
TABELA 4 – CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DO PAINEL SOLAR WARMSUN FKC-2S. FONTE (VULCANO, 2018)	60
TABELA 5 - PARÂMETROS DE CÁLCULO DO MÉTODO DA FRAÇÃO SOLAR.....	61
TABELA 6 - TEMPERATURA AMBIENTE MÉDIA MENSAL DAS CIDADES EM ESTUDO.	64
TABELA 7 - COMPARAÇÃO DOS VALORES DE IRRADIAÇÃO PARA DIFERENTES INCLINAÇÕES NA CIDADE DE BRAGANÇA - PARTE 1.....	73
TABELA 8 - COMPARAÇÃO DOS VALORES DE IRRADIAÇÃO PARA DIFERENTES INCLINAÇÕES NA CIDADE DE BRAGANÇA - PARTE 2.....	74
TABELA 9 - COMPARAÇÃO DOS VALORES DE IRRADIAÇÃO PARA DIFERENTES INCLINAÇÕES NA CIDADE DE CASTELO BRANCO - PARTE 1.....	74
TABELA 10 - COMPARAÇÃO DOS VALORES DE IRRADIAÇÃO PARA DIFERENTES INCLINAÇÕES NA CIDADE DE CASTELO BRANCO - PARTE 2.	75
TABELA 11 - COMPARAÇÃO DOS VALORES DE IRRADIAÇÃO PARA DIFERENTES INCLINAÇÕES NA CIDADE DE ÉVORA - PARTE 1.	75
TABELA 12 - COMPARAÇÃO DOS VALORES DE IRRADIAÇÃO PARA DIFERENTES INCLINAÇÕES NA CIDADE DE ÉVORA - PARTE 2.	76
TABELA 13 - COMPARAÇÃO DOS VALORES DE IRRADIAÇÃO PARA DIFERENTES INCLINAÇÕES NA CIDADE DE FARO - PARTE 1.....	77
TABELA 14 - COMPARAÇÃO DOS VALORES DE IRRADIAÇÃO PARA DIFERENTES INCLINAÇÕES NA CIDADE DE FARO - PARTE 2.....	77
TABELA 15 - COMPARAÇÃO DOS VALORES DE IRRADIAÇÃO PARA DIFERENTES INCLINAÇÕES NA CIDADE DE LISBOA - PARTE 1.	78
TABELA 16 - COMPARAÇÃO DOS VALORES DE IRRADIAÇÃO PARA DIFERENTES INCLINAÇÕES NA CIDADE DE LISBOA - PARTE 2.	78

TABELA 17 - COMPARAÇÃO DOS VALORES DE IRRADIAÇÃO PARA DIFERENTES INCLINAÇÕES NA CIDADE DE PORTO - PARTE 1.	79
TABELA 18 - COMPARAÇÃO DOS VALORES DE IRRADIAÇÃO PARA DIFERENTES INCLINAÇÕES NA CIDADE DE PORTO - PARTE 2.	79
TABELA 19 - COMPARAÇÃO DOS VALORES DE IRRADIAÇÃO PARA DIFERENTES INCLINAÇÕES NA CIDADE DE VIANA DO CASTELO - PARTE 1.	80
TABELA 20 -COMPARAÇÃO DOS VALORES DE IRRADIAÇÃO PARA DIFERENTES INCLINAÇÕES NA CIDADE DE VIANA DO CASTELO - PARTE 2.	81
TABELA 21 - IRRADIAÇÃO INCIDENTE NUMA SUPERFÍCIE POUSADA NA CIDADE DE BRAGANÇA EM FUNÇÃO DA INCLINAÇÃO.	82
TABELA 22 - IRRADIAÇÃO INCIDENTE NUMA SUPERFÍCIE POUSADA NA CIDADE DE CASTELO BRANCO EM FUNÇÃO DA INCLINAÇÃO.	83
TABELA 23 - IRRADIAÇÃO INCIDENTE NUMA SUPERFÍCIE POUSADA NA CIDADE DE ÉVORA EM FUNÇÃO DA INCLINAÇÃO.	84
TABELA 24 - IRRADIAÇÃO INCIDENTE NUMA SUPERFÍCIE POUSADA NA CIDADE DE FARO EM FUNÇÃO DA INCLINAÇÃO.	85
TABELA 25 - IRRADIAÇÃO INCIDENTE NUMA SUPERFÍCIE POUSADA NA CIDADE DE LISBOA EM FUNÇÃO DA INCLINAÇÃO.	86
TABELA 26 - IRRADIAÇÃO INCIDENTE NUMA SUPERFÍCIE POUSADA NA CIDADE DO PORTO EM FUNÇÃO DA INCLINAÇÃO.	87
TABELA 27 - IRRADIAÇÃO INCIDENTE NUMA SUPERFÍCIE POUSADA NA CIDADE DE VIANA DO CASTELO EM FUNÇÃO DA INCLINAÇÃO.	88
TABELA 28 - PARÂMETROS CONSIDERADOS PARA O CÁLCULO DO COP.	92
TABELA 29 - PARÂMETROS CONSIDERADOS PARA O CÁLCULO DO COP.	93
TABELA 30 - PARÂMETROS CONSIDERADOS PARA O CÁLCULO DO COP.	94
TABELA 31 - PARÂMETROS CONSIDERADOS PARA O CÁLCULO DO COP.	96
TABELA 32 -POTÊNCIA ASSOCIADA AO GERADOR EM FUNÇÃO DA VARIAÇÃO DE TEMPERATURA DOS COMPONENTES DO SISTEMA.....	97
TABELA 33 - FRAÇÃO SOLAR OBTIDA PARA A CIDADE DE BRAGANÇA COM 50 PAINÉIS SOLARES TÉRMICOS PARA BRAGANÇA.	99
TABELA 34 - FRAÇÃO SOLAR OBTIDA PARA A CIDADE DE BRAGANÇA COM 50 PAINÉIS SOLARES TÉRMICOS PARA CASTELO BRANCO.	101

TABELA 35 - FRAÇÃO SOLAR OBTIDA PARA A CIDADE DE BRAGANÇA COM 50 PAINÉIS SOLARES TÉRMICOS PARA ÉVORA.	102
TABELA 36 - FRAÇÃO SOLAR OBTIDA PARA A CIDADE DE BRAGANÇA COM 50 PAINÉIS SOLARES TÉRMICOS PARA FARO.....	104
TABELA 37 - FRAÇÃO SOLAR OBTIDA PARA A CIDADE DE BRAGANÇA COM 50 PAINÉIS SOLARES TÉRMICOS PARA LISBOA.	105
TABELA 38 - FRAÇÃO SOLAR OBTIDA PARA A CIDADE DE BRAGANÇA COM 50 PAINÉIS SOLARES TÉRMICOS PARA PORTO.	107
TABELA 39 - FRAÇÃO SOLAR OBTIDA PARA A CIDADE DE BRAGANÇA COM 50 PAINÉIS SOLARES TÉRMICOS PARA VIANA DO CASTELO.	108
TABELA 40 - CUSTO DO SISTEMA SOLAR TÉRMICO.	110
TABELA 41 - ECONOMIA ANUAL EM FUNÇÃO DA ENERGIA GERADA PELO PAINEL EM BRAGANÇA E CASTELO BRANCO.	111
TABELA 42 - ECONOMIA ANUAL EM FUNÇÃO DA ENERGIA GERADA PELO PAINEL EM ÉVORA E FARO..	111
TABELA 43 - ECONOMIA ANUAL EM FUNÇÃO DA ENERGIA GERADA PELO PAINEL EM LISBOA, PORTO E VIANA DO CASTELO.....	112
TABELA 44 - TEMPO DE RETORNO DO INVESTIMENTO INICIAL PARA AS DIFERENTES CIDADES EM ESTUDO.	112

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	32
1.1	Panorama energético mundial	33
1.2	Refrigeração por energia solar	34
1.3	Objetivo do projeto de dissertação	35
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	38
2.1	Refrigeração por absorção LiBr/H₂O.....	38
2.1.1	Princípio de funcionamento	38
2.1.2	Fluido frigorífero	40
2.2	Transmissão de calor num painel solar térmico	43
2.2.1	Relação entre o Sol e a Terra.....	43
2.2.2	Radiação solar	48
2.2.3	Radiação solar que incide sobre uma superfície inclinada pousada na superfície terrestre ..	52
2.2.4	Painel solar plano	53
2.3	Descrição do caso de estudo	58
2.3.1	Sistema de refrigeração solar	59
2.4	Método da fração solar ou <i>f-chart</i>.....	60
2.4.1	Parâmetros adimensionais X e Y	61
2.4.2	Temperatura ambiente média mensal das cidades em estudo	63
2.4.3	Parâmetros de cálculo do método da fração solar associados ao painel solar térmico	64
2.4.4	Parâmetros adicionais para a aplicação do método da fração solar	65
3	DESENVOLVIMENTO	69

3.1	Valores dos ângulos horários do pôr do Sol.....	69
3.2	Valores da radiação incidente	70
3.3	Radiação global diária média mensal	71
3.4	Comparação dos resultados da irradiação incidente em uma superfície inclinada segundo os dados obtidos pela NASA.....	72
3.5	Comparação da irradiação em função do ângulo de inclinação	81
3.6	Cálculo da potência térmica associada ao gerador	88
3.6.1	Caso de estudo 1	91
3.6.2	Caso de estudo 2	93
3.6.3	Caso de estudo 3	94
3.6.4	Caso de estudo 4	95
3.7	Valores obtidos para a potência associada ao gerador.....	97
3.8	Aplicação do método da fração solar	98
3.8.1	Resultados para a cidade de Bragança.....	98
3.8.2	Resultados para a cidade de Castelo Branco.....	100
3.8.3	Resultados para a cidade de Évora.....	101
3.8.4	Resultados para a cidade de Faro.....	103
3.8.5	Resultados para a cidade de Lisboa.....	104
3.8.6	Resultados para a cidade de Porto.....	106
3.8.7	Resultados para a cidade de Viana do Castelo	107
3.9	Estudo económico.....	109
3.9.1	Custo do sistema	109
3.9.2	Custo da energia elétrica em Portugal	110
3.9.3	Resultados da economia anual e do PRI.....	111
4	CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS	117
4.1	CONCLUSÕES E PROPOSTA DE TRABALHOS FUTUROS.....	117
5	BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO.....	123
6	ANEXOS.....	127

6.1	Valores obtidos para o cálculo da irradiação	127
6.2	Dados dos valores calculados para o resultado da fração solar.	141
6.3	Ficha técnica do painel solar	148

INTRODUÇÃO

- 1.1 PANORAMA ENERGÉTICO MUNDIAL
- 1.2 REFRIGERAÇÃO POR ENERGIA SOLAR
- 1.3 OBJETIVO DO PROJETO DE DISSERTAÇÃO

1 INTRODUÇÃO

Um olhar retrospectivo sobre as fontes e as formas de energia utilizadas pela humanidade ao longo da história releva uma enorme variedade, tais como, força humana, carvão, petróleo, água, vento, biomassa e a eletricidade. Cada uma foi indispensável para o desenvolvimento da humanidade, no entanto apresentam limites, questões e desafios.

Com o desenvolvimento tecnológico e a crescente procura por energia, leva a que as fontes de energia primárias convencionais, combustíveis fósseis, sejam consumidos a um ritmo cada vez maior. Sendo os combustíveis fósseis uma fonte de energia não renovável, o constante crescimento no seu consumo, conduzirá ao seu fim num prazo cada vez menor (Bach, 2010).

A preocupação com os impactos ambientais adjacentes à utilização de combustíveis fósseis, está constantemente a ganhar espaço no nosso dia-a-dia, assim como, a consciencialização de que é necessário um equilíbrio relativamente aos recursos naturais na Terra. As emissões de gases com efeito de estufa com a queima de combustíveis fósseis são a causa desta preocupação. O dióxido de carbono (CO_2), gás de efeito de estufa, é o principal responsável pelo aquecimento global, nos últimos anos a sua concentração na atmosfera tem aumentado (Bach, 2010).

De acordo com a International Energy Agency (IEA), (2017) o cenário energético, comparando os últimos vinte e cinco anos, mudou. O petróleo deixou de ser a energia primária mais utilizada, dando o seu lugar ao gás natural. De salientar que, no mesmo período, houve um forte crescimento das energias renováveis e na sua eficiência energética.

A eficiência energética é essencial em qualquer estratégia para garantir um crescimento económico seguro, sustentável e inclusivo. O fornecimento de energia de forma segura

e económica permite aumentar a competitividade e o bem-estar, assim como reduzir a pegada ambiental do atual sistema energético (Agency, 2019).

O fornecedor energético mais importante para a Terra é o Sol. Dele provem quase toda a energia ativa na superfície terrestre, é o ponto de equilíbrio dos diferentes sistemas. Além disso é a fonte de energia mais ecológica, podendo ser utilizada das mais diferentes formas. O poder energético fornecido pelo Sol, $1,5 \times 10^{18}$ kWh/ano, é 10 000 vezes superior às necessidades energéticas mundiais. Os sistemas solares são assim uma boa alternativa aos combustíveis fósseis, representam um alto nível de responsabilidade, compromisso e consciência ambiental (Bach, 2010).

1.1 Panorama energético mundial

A energia desempenha um papel crucial no desenvolvimento/crescimento económico e bem-estar humano. Os atuais sistemas de energia têm uma grande influência no ambiente e clima, em causa está a queima de combustíveis fósseis e consequente emissão de substâncias perigosas para a atmosfera. Alcançar um equilíbrio entre o desenvolvimento e o meio ambiente, de modo a que todos tenham acesso a energia sustentável suficiente é um desafio (Roser, 2020).

De acordo com a publicação do relatório anual da Agência Internacional de Energia (Agency, 2019), as políticas ambientais não estão a seguir uma rota que nos leve a cumprir as metas estabelecidas no Acordo de Paris. Deve haver uma grande mudança no setor energético, direcionando o rumo para as fontes com baixa emissão de carbono.

“O mundo precisa urgentemente de um foco semelhante ao laser na redução das emissões globais. Isso exige uma grande coalizão que inclua governos, investidores, empresas e todos os demais comprometidos em combater as mudanças climáticas.”

Dr. Fatih Birol, Diretor Executivo da IEA (Agency, 2019).

Segundo o mesmo relatório a dependência de combustíveis fósseis permanece alta, na atual realidade dos sistemas energéticos. Embora a previsão seja para uma redução na demanda destes combustíveis e um aumento significativo na aposta em energias renováveis, no cenário atual, se nada mudar, travar as emissões poluentes será mais difícil.

Nos dias de hoje o mundo atravessa uma crise de saúde global com impacto na economia global, uso de energia e emissões de CO₂. No primeiro trimestre do ano a demanda de energia diminuiu 3,8%, este valor pode aumentar dependendo da duração e do rigor das imposições feitas na luta contra a atual pandemia (IEA, 2020).

Segundo a mesma fonte projeta-se que este ano, as energias renováveis sejam a única fonte de energia a crescer comparando com o ano de 2019, contrastando com o cenário projetado para os combustíveis fósseis e nuclear.

1.2 Refrigeração por energia solar

A última década assistiu a um forte crescimento no aproveitamento e implementação de tecnologias de energia renovável, embora, em setores de uso final de energia, como indústria e edifícios, a adoção de fontes de energia renovável foi mais lenta (Agency, 2019).

Segundo dados da IEA, o uso de energia para refrigeração pode aumentar mais do dobro entre os dias de hoje e 2040, devido ao aumento da atividade e do uso de ar condicionado (IEA, 2019). A energia solar aumenta a necessidade de refrigeração, assim como, permite a produção de energia renovável que pode ser usada em equipamentos de refrigeração (IEA, 2017).

Com o potencial energético que a energia solar oferece, a sua utilização para suprir as necessidades de conforto térmico tem suscitado interesse. Resultando das preocupações ambientais, o aproveitamento da energia solar através de sistemas solares térmicos, em sistemas de refrigeração por absorção é uma alternativa sustentável, pois economiza energia e é ecologicamente limpa (Majdi, 2016).

A energia solar térmica sofreu uma queda no seu crescimento ao longo dos últimos 5 anos, apenas desta queda prevê-se que o consumo de energia solar térmica, aumente quase 50% entre 2019 e 2024, sendo os edifícios responsáveis por 90% desse aumento, devido à redução de custos inerentes a estes sistemas (Agency, 2019).

1.3 Objetivo do projeto de dissertação

Este trabalho foi realizado no âmbito da Unidade Curricular Dissertação, com o acréscimo de um Estágio Curricular na empresa STEG, dedicada à prestação de serviços na área energética, com foco na redução dos consumos energéticos em edifícios de serviço e habitação.

O objetivo deste estudo é de analisar o desempenho e a rentabilidade de um sistema de refrigeração por absorção LiBr/H₂O, em que o calor fornecido ao gerador é parcialmente de origem solar.

Com a introdução do estágio curricular no decorrer da Dissertação, foi possível promover uma formação mais avançada dos sistemas de refrigeração, explorando diferentes conceitos e tecnologias. Por outro lado, permitiu um acompanhamento permanente de um grupo de trabalho qualificado e com competências diversificadas, fomentando assim a aprendizagem e o desenvolvimento num contexto laboral.

O foco da presente Dissertação passa por apresentar e analisar um estudo do potencial solar de diferentes cidades do nosso país, passando pelo levantamento e avaliação de diversas configurações quanto à quantidade de energia fornecida por uma painel solar e, posteriormente, pela análise do funcionamento de sistema de refrigeração por absorção nessas configurações.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

- 2.1 REFRIGERAÇÃO POR ABSORÇÃO LIBR/H₂O
 - 2.1.1 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO
 - 2.1.2 FLUIDO FRIGORIGÉNEO
- 2.2 TRANSMISSÃO DE CALOR NUM PAINEL SOLAR TÉRMICO
 - 2.2.1 RELAÇÃO ENTRE O SOL E A TERRA
 - 2.2.2 RADIAÇÃO SOLAR
 - 2.2.3 RADIAÇÃO SOLAR QUE INCIDE SOBRE UMA SUPERFÍCIE INCLINADA POUSADA NA SUPERFÍCIE TERRESTRE
 - 2.2.4 PAINEL SOLAR PLANO
- 2.3 DESCRIÇÃO DO CASO DE ESTUDO
 - 2.3.1 SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO SOLAR
- 2.4 MÉTODO DA FRAÇÃO SOLAR OU *F-CHART*
 - 2.4.1 PARÂMETROS ADIMENSIONAIS X E Y
 - 2.4.2 TEMPERATURA AMBIENTE MÉDIA MENSAL DAS CIDADES EM ESTUDO
 - 2.4.3 PARÂMETROS DE CÁLCULO DO MÉTODO DA FRAÇÃO SOLAR ASSOCIADOS AO PAINEL SOLAR TÉRMICO
 - 2.4.4 PARÂMETROS ADICIONAIS PARA A APLICAÇÃO DO MÉTODO DA FRAÇÃO SOLAR

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é feito um enquadramento do tema, com os conceitos fundamentais. Está dividido em três subtemas. O primeiro dedicado aos sistemas refrigeração por absorção LiBr/H₂O, as suas configurações e fluidos de trabalho. O segundo dedicado à análise de como ocorre a transmissão de calor em painéis solares e por último o método utilizado para a quantificação e análise da energia solar incidente num painel solar.

2.1 Refrigeração por absorção LiBr/H₂O

2.1.1 Princípio de funcionamento

Os sistemas de refrigeração por absorção oferecem uma alternativa aos sistemas convencionais de refrigeração por compressão de vapor (VCRS), uma vez que a fonte de energia que utilizam pode ser a queima de combustíveis fósseis ou, como neste estudo se pretende, através de energia solar.

Estes sistemas, tal como o próprio nome indica, tem como base a absorção de um fluido frigorígeno. Fazem parte destes sistemas quatro componentes principais, gerador, condensador, o evaporador e o absorvedor. A figura 1 ilustra os componentes que caracterizam o sistema (Nikbakhti, et al., 2020).

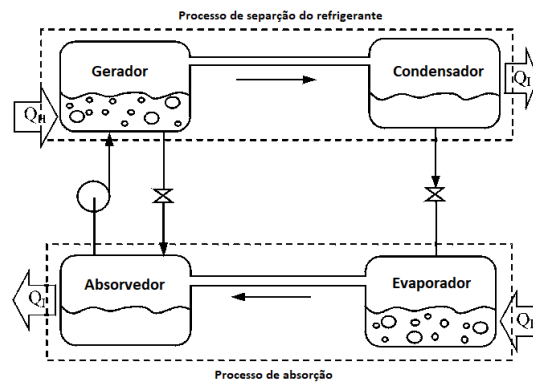


Figura 1 - Esquema geral de um sistema de refrigeração por absorção de simples efeito. Fonte: (Nikbakhti, et al., 2020) - adaptada.

À saída do absorvedor a solução fraca é transportada através de uma bomba até ao gerador. Com o calor fornecido ao gerador, a água é separada sob a forma de vapor e enviada para o condensador, onde é condensada por água fria ou ar, através da rejeição de calor. O fluido frigorífero, que é a água, expande-se para uma pressão mais baixa através da válvula laminagem e chega ao evaporador, onde absorve calor do espaço que se pretende arrefecer. No absorvedor a água, no estado de vapor, é absorvida pelo LiBr e forma-se uma solução líquida, que é bombeada para o gerador, figura 2 (Majdi, 2016).

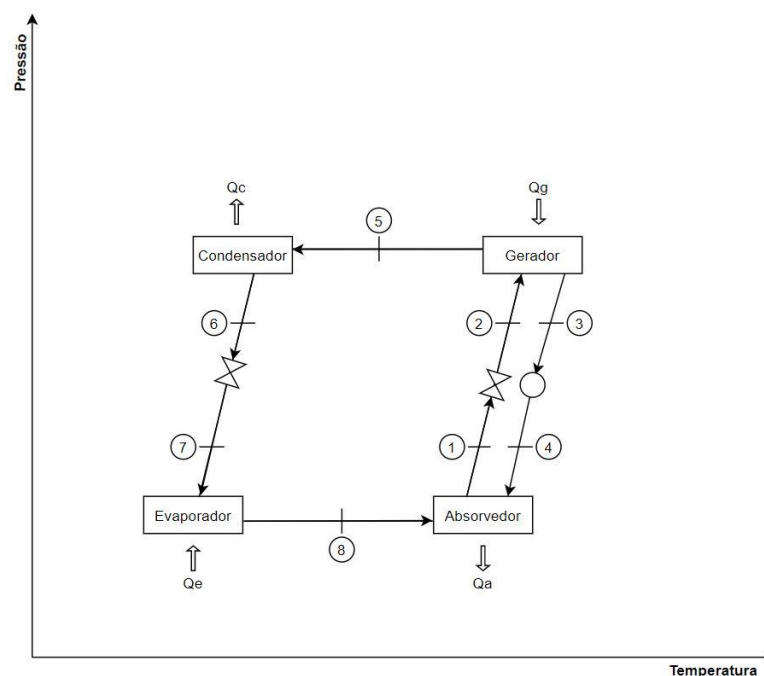


Figura 2 - Representação do ciclo de refrigeração por absorção. Fonte: autoria própria.

Estes sistemas apresentam inúmeras vantagens:

- Podem ser acionados por fontes de energia renovável, tornando o sistema economicamente energético e muito eficaz na redução das emissões de CO₂;
- Funcionam com frigorigêneos não poluentes;
- Manutenção económica e fácil;
- Possibilidade de fazer recuperação de calor;
- Têm uma vida útil esperada entre os 20 e 30 anos (Nikbakhti, et al., 2020).

Apesar de apresentar inúmeros benefícios, o coeficiente de desempenho (COP) deste sistemas é inferior, comparando com os sistemas convencionais VCRS. O COP é definido através da expressão 2.1.

$$COP = \frac{\dot{Q}_{evaporador}}{\dot{Q}_{gerador}} \quad (2.1)$$

2.1.2 Fluido frigorigéneo

O desempenho de um sistema de refrigeração por absorção depende das propriedades químicas e termodinâmicas do fluido de trabalho. Na escolha do fluido de trabalho para este sistema de refrigeração por absorção, a substância absorvedora, LiBr deve ter as seguintes características:

- Alta capacidade de absorção e dessorção;
- Boa condutibilidade térmica;
- Quimicamente compatível com o frigorigéneo, neste caso de estudo a água;
- Baixo custo e fácil acesso.

Para a escolha do frigorigéneo devem ser seguidos os seguintes fatores:

- Temperatura de evaporação se possível inferior a 0°C;
- Fácil absorção;
- Elevada condutibilidade térmica;
- Boa estabilidade química;
- Baixa viscosidade e poder calorífico;

- Sem propriedades tóxicas, inflamáveis e corrosivas;
- Quimicamente estável na temperatura de trabalho (Anirban Sur, 2010).

As combinações mais comuns são $\text{LiBr}/\text{H}_2\text{O}$ e $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$, estas conseguem formar uma solução homogênea dentro da faixa de temperatura operacional do ciclo. Além disso oferecem um bom desempenho termodinâmico e não são prejudiciais para o meio ambiente (Nikbakhti, et al., 2020).

O LiBr é um sal sólido cristalino que com a presença de vapor de água, o absorve, e torna-se numa solução líquida. A solução líquida exerce uma pressão de vapor de água resultante da concentração (x) e temperatura (T) da solução.

A figura 3 mostra o diagrama de temperatura-pressão-concentração para a solução $\text{LiBr}/\text{H}_2\text{O}$. Este diagrama é aplicado para soluções saturadas de equilíbrio da solução com vapor de água. Em função da temperatura de trabalho do ciclo de refrigeração por absorção é possível obter o valor da concentração da solução através do diagrama (Stoecker, et al., 1985).

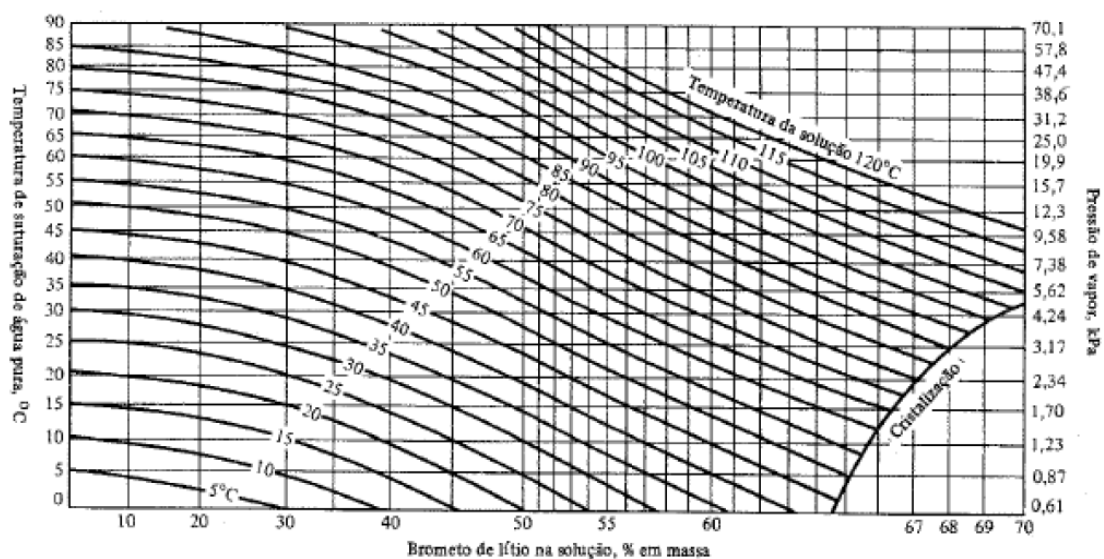


Figura 3 - Diagrama temperatura-pressão-concentração da solução $\text{LiBr}/\text{H}_2\text{O}$. Fonte: Stoecker (1985).

Um dado importante para os cálculos térmicos nos ciclos de refrigeração por absorção é a entalpia das substâncias de trabalho para os diferentes pontos cruciais do ciclo. Quando a água no estado líquido ou de vapor vai para o condensador e evaporador, nestes componentes do sistema, o valor da entalpia pode ser determinado através de uma tabela de propriedades da água. Por outro lado, nos componentes gerador e

absorvedor, onde está presente a solução de LiBr/H₂O, a entalpia é determinada em função da temperatura e concentração da solução. Através do diagrama apresentado na figura 4 é possível obter o valor da entalpia (Foster, et al., 2009).

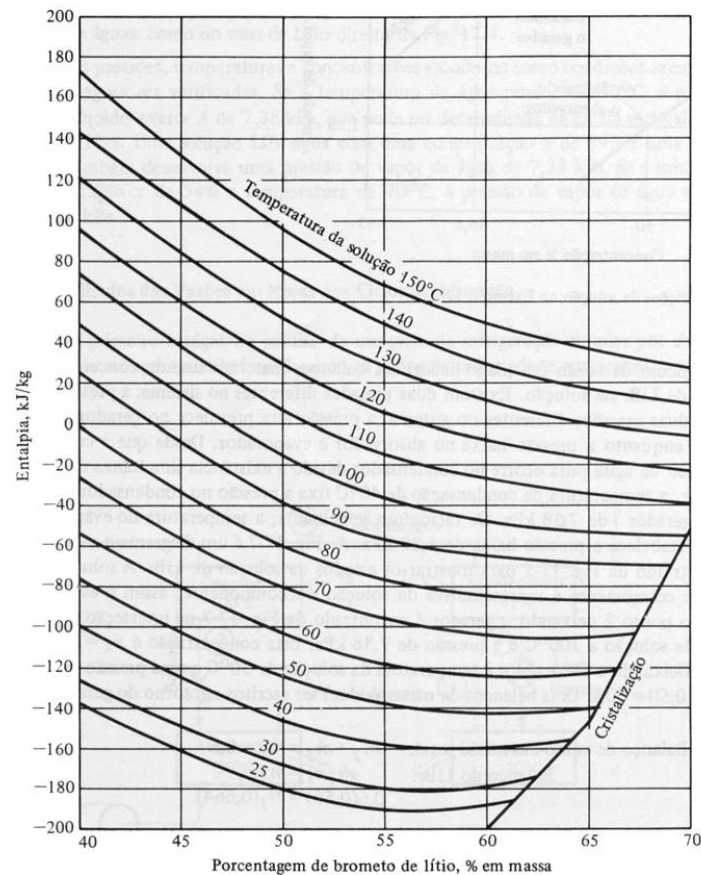


Figura 4 - Entalpia da solução LiBr/H₂O. Fonte: Stoecker (1985).

Nas figuras 3 e 4 em ambos os diagramas é mostrado uma linha de cristalização, esta depende da temperatura da solução e define o limite superior da concentração da solução. Para o bom funcionamento do ciclo é fundamental que a linha limite de concentração não seja ultrapassada, ou seja, a concentração da solução não pode estar muito alta e a temperatura da solução muito baixa (Prasartkaew, 2014).

2.2 Transmissão de calor num painel solar térmico

O aproveitamento da energia solar térmica pode ser feita de duas formas, passiva e ativa. De forma passiva através dos ganhos incidentes num edifício, permitindo a acumulação de calor. A radiação incidente é parcialmente absorvida, resultando no aquecimento da estrutura de um edifício, um maior ou menor aquecimento fica dependente das variações de sombreamento e da ventilação do espaço. Por outro lado, temos o aproveitamento pela forma ativa, que possibilita obter temperaturas bem mais elevadas do que as de conforto térmico, sendo utilizadas soluções que constituem o aproveitamento da energia solar de forma ativa. Dentro das soluções existe o aquecimento de águas quentes sanitárias e ambiente de edifícios, cuja captação da radiação solar permite efetuar o aquecimento de um fluido térmico que é utilizado com esses fins. Esse mesmo fluido térmico pode ainda ser utilizado como fonte de calor para um sistema de refrigeração por absorção, sendo neste caso a radiação solar uma fonte de calor para produzir “frio” (Roriz, et al., 2010).

2.2.1 Relação entre o Sol e a Terra

A quantidade e intensidade de radiação solar que chega à superfície terrestre está dependente da posição entre o Sol e a Terra. Ao longo do dia o Sol apresenta diferentes movimentos o que influencia o ângulo de incidência na superfície terrestre. Para quantificar a energia solar recebida pelo painel solar térmico é importante conhecer a trajetória do Sol ao longo do ano, ver figura 5, pelas coordenadas do Sol (declinação e ascensão reta) e do lugar (latitude e longitude). (Foster, et al., 2009).

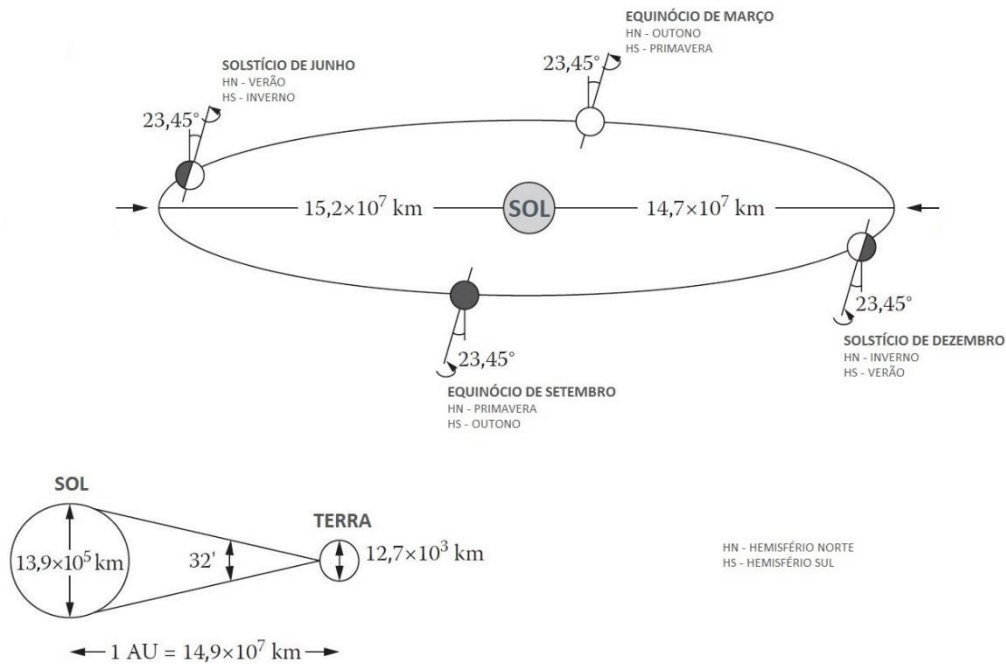


Figura 5 - Movimento da Terra em torno do Sol. Fonte: (Foster, et al., 2009) – adaptada.

2.2.1.1 Sistema de coordenadas terrestre

A latitude (ϕ) e a longitude (λ) são usadas como sistema de coordenadas terrestres, estas definem qualquer local na face terrestre, figura 6. Estas representam um ângulo geralmente representado em graus. A latitude corresponde ao ângulo de elevação entre a linha de equador da Terra a qualquer local na face terrestre ao longo do Meridiano de Greenwich. O seu valor varia entre -90° , no Pólo Sul e 90° , no Pólo Norte, sendo 0° na linha do equador. Por outro lado, a longitude corresponde ao ângulo entre a distância do local na face terrestre ao Meridiano de Greenwich, medido ao longo da linha do equador. O seu valor varia entre os 0° e os 180° para este ou oeste desde o Meridiano de Greenwich (Foster, et al., 2009).

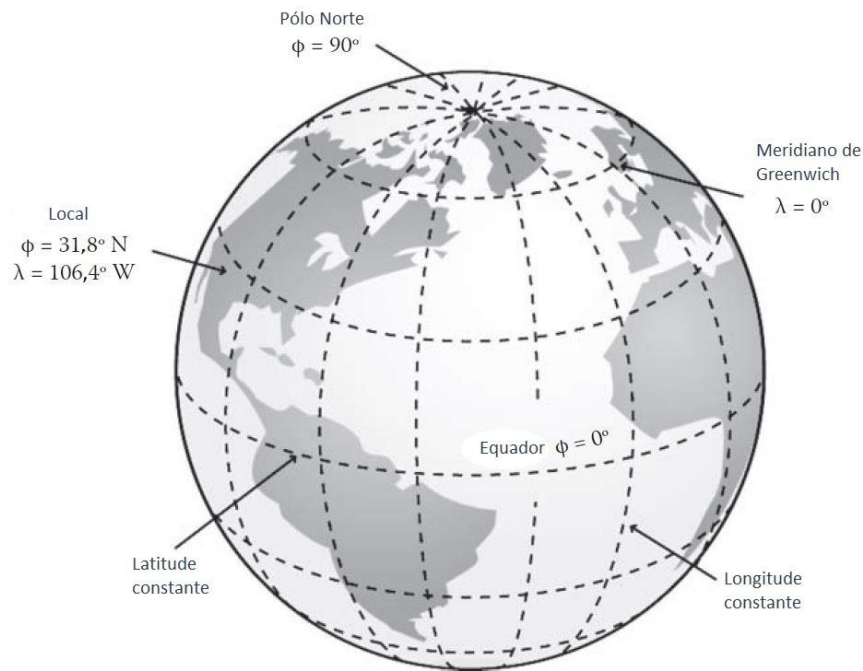


Figura 6 - Sistema de coordenadas terrestre. Fonte: (Foster, et al., 2009) – adaptada.

Para além das coordenadas acima descritas, falta ainda caracterizar mais três ângulos, altura solar (α_s), zênite (θ_s) e azimute solar. Estes são fundamentais para descrever a posição do Sol em relação à superfície terrestre horizontal. A figura 7 ilustra as relações geométricas entre os três ângulos e a posição do Sol durante a sua trajetória diária (Foster, et al., 2009).

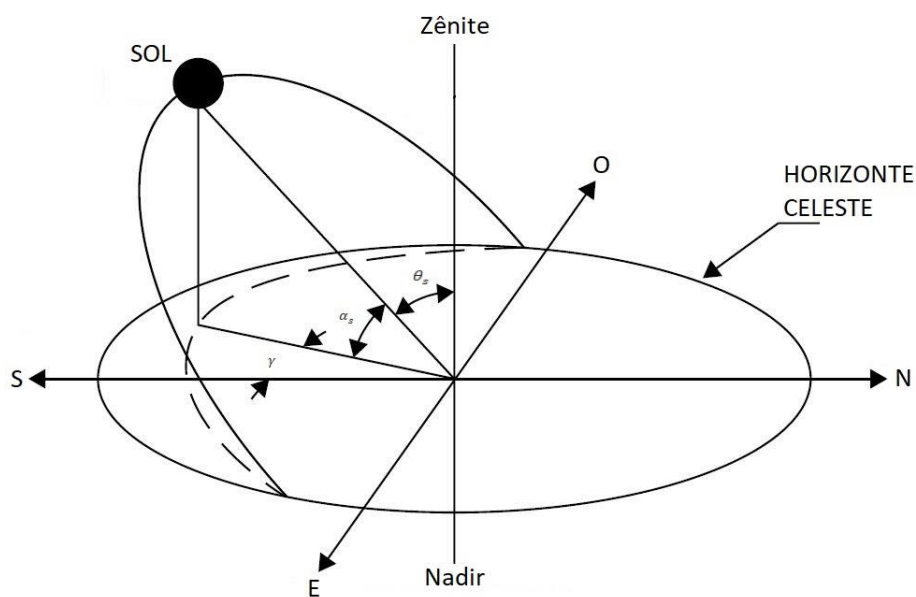


Figura 7 - Posição do Sol relativamente aos ângulos solares. Fonte: (Kalogirou, 2009) – adaptada.

2.2.1.1.1 Coordenadas geográficas das cidades em estudo

Na tabela 1 estão apresentados os valores das coordenadas terrestres das cidades em estudo.

Tabela 1 - Coordenadas geográficas das cidades em estudo.

Posição geográfica das cidades em estudo		
Cidades	Latitude	Longitude
Bragança	41,80°	-6,76°
Viana do Castelo	41,69°	-8,83°
Porto	41,16°	-8,63°
Castelo Branco	39,82°	-7,49°
Lisboa	38,72°	-9,14°
Évora	38,57°	-7,91°
Faro	37,02°	-7,93°

2.2.1.2 Sistema de coordenadas equatoriais

A declinação solar (δ) representa uma das duas coordenadas do sistema de coordenadas equatoriais. Esta define-se como sendo a distância angular do Sol em relação ao plano do equador celeste (Foster, et al., 2009).

O movimento da Terra em torno do Sol assume uma forma elíptica, conforme foi mostrado anteriormente na figura 5, o eixo de rotação da Terra tem uma inclinação de 23,45° em relação ao equador celeste, e é o módulo da declinação solar nos solstícios (Kalogirou, 2009). A declinação é medida para norte ou para sul do plano do equador, tal como a latitude da Terra, os seus valores variam entre -23,45°, no solstício de dezembro e 23,45°, no solstício de junho, sendo 0° na linha do equador. Consoante o movimento orbital da Terra em torno do Sol, o valor da declinação solar vai variando, figura 8 (Foster, et al., 2009).

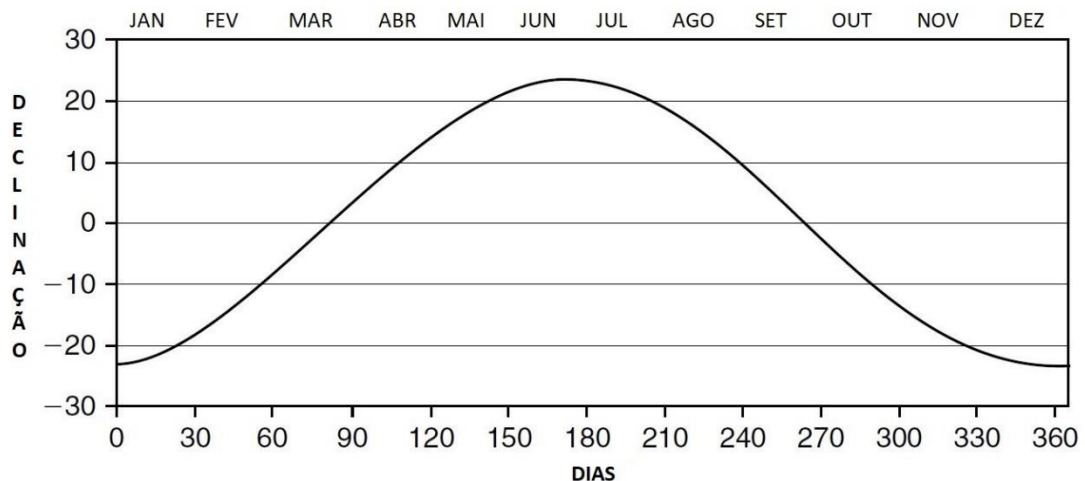


Figura 8 - Declinação solar ao longo de um ano. Fonte: (Kalogirou, 2009) – adaptada.

O valor do ângulo da declinação solar pode ser obtido através da equação 2.2, definida por Cooper (1969),

$$\delta = 23,45 \sin\left(\frac{360}{365} (284 + n)\right) \quad (2.2)$$

onde n representa o dia do ano (Foster, et al., 2009).

Dufie e Beckman (2013), apresentam uma tabela com os dias que melhor representam a declinação média mensal, esse valor está apresentado na tabela 2.

Tabela 2 - Média de dias recomendado para cada mês.

Meses	Dia, i	n para o dia do mês	n
Janeiro	17	i	17
Fevereiro	16	$31+i$	47
Março	16	$59+i$	75
Abril	15	$90+i$	105
Mai	15	$120+i$	135
Junho	11	$151+i$	162
Julho	17	$181+i$	192
Agosto	16	$212+i$	228
Setembro	15	$243+i$	258
Outubro	15	$273+i$	288
Novembro	14	$304+i$	318
Dezembro	10	$334+i$	344

O ângulo horário do pôr do sol (H_{ss}) está relacionado com a duração do dia. No cálculo da radiação solar incidente num painel solar térmico é importante determinar o ângulo horário do pôr do Sol, onde está localizado o painel. Este valor obtém-se em função da declinação solar e da latitude e pode ser obtido através da equação 2.3 (Duffie, et al., 2013).

$$H_{ss} = \cos^{-1}(-\tan \delta \tan \varphi) \quad (2.3)$$

2.2.2 Radiação solar

O Sol encontra-se a uma distância média de 148 milhões de quilómetros (km) da Terra e a energia sob a forma de radiação que ele fornece à Terra em quatro horas seria suficiente para satisfazer as necessidades de energia que os humanos usam em um ano (Earthscan, 2005).

As trocas de calor existente num painel solar térmico estão relacionadas com os diferentes tipos de fenómenos de transmissão de calor, sendo eles a radiação, condução e convecção (Roriz, et al., 2010).

De toda a energia emitida pelo Sol, apenas uma pequena parte chega à atmosfera terrestre. A redução da intensidade de radiação solar ao atravessar a atmosfera deve-se aos seguintes fatores:

- Reflexões devido à atmosfera;
- Absorção através de moléculas de gases na atmosfera;
- Difusão:
 - Rayleigh, difusão através de moléculas de ar (por exemplo O_2 , O_3 , H_2O , CO_2);
 - Mie, difusão através de partículas de pó e contaminação do ar.

Estes fatores atuam em função dos comprimentos de onda como se pode observar na figura 9.

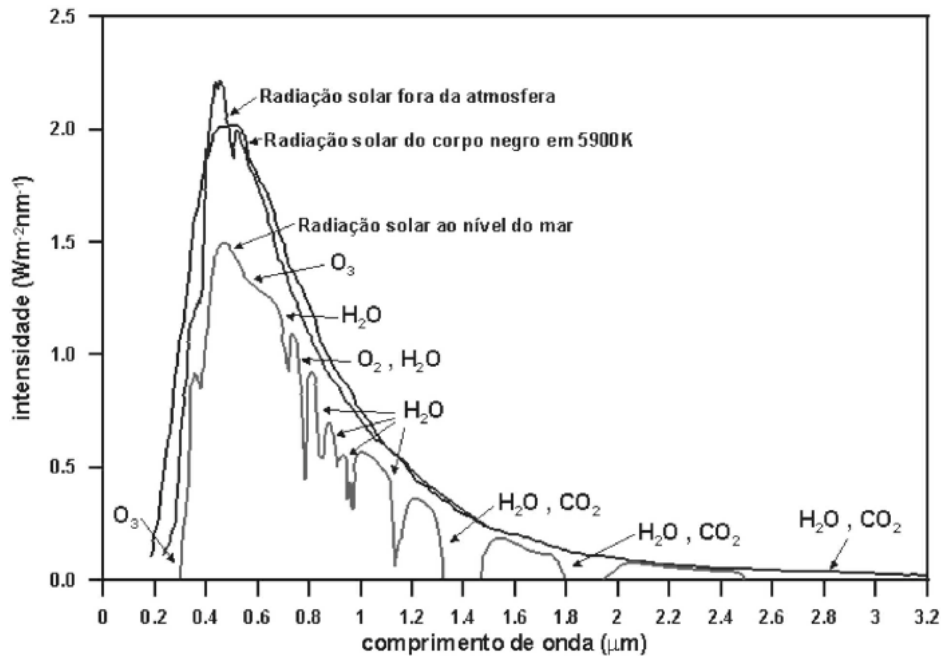


Figura 9 - Curvas do espectro de emissão da radiação solar. Fonte: (Vardavas, et al., 2006) - adaptada.

A potência térmica que chega à superfície terrestre por unidade de área, quando a Terra está a uma distância média do Sol é designada de constante solar (S_0). Esta está sujeita a pequenas variações devido a mudanças na atividade do Sol ou por diferença de distância entre a Terra e o Sol, não sendo significativas na aplicação da constante solar para tecnologias solares. O valor médio da constante solar é de $1,367 \text{ kW/m}^2$ (Bach, 2010).

Com as variações da posição do Sol ao longo do dia, a constante solar também varia. A potência solar média diária por unidade de área, que chega ao exterior da atmosfera pode ser calculada através da expressão 2.4, sendo n o dia do ano (Duffie, et al., 2013).

$$S_n = S_0 \left[1 + 0,033 \cos\left(\frac{360n}{365}\right) \right] \quad (2.4)$$

Para um melhor aproveitamento da energia fornecida pelo Sol é importante que a superfície do painel solar térmico sobre a qual vai incidir a radiação solar, consiga absorver e fornecer ao fluido o máximo da energia recebida pelo Sol (Bach, 2010). Para isso é necessário conhecer a posição do Sol em relação à superfície do painel solar térmico que recebe a radiação solar, de forma a determinar a parcela de radiação solar que pode ser absorvida pela superfície do painel solar térmico (Roriz, et al., 2010).

2.2.2.1 Radiação solar extraterrestre que incide sobre uma superfície horizontal

Para o caso em estudo interessa saber o valor da energia média diária (S_D) que incide sobre uma superfície horizontal. A equação 2.5 dá esse valor para um dia em função da posição do Sol e para um determinado ponto da Terra.

$$S_D = \frac{24 \times 3600}{\pi} S_n \left(\cos \varphi \cos \delta \sin H_{ss} + \frac{2\pi H_{ss}}{360} \sin \varphi \sin \delta \right) \quad (2.5)$$

2.2.2.1.1 Radiação direta, difusa e albedo

Para determinar a radiação solar que é recebida por um painel é necessário fazer um balanço entre os três tipos de radiação. A radiação global que incide num painel é dada pelo somatório dos três tipos de radiação (Roriz, et al., 2010):

Direta (R_{DIR}) – radiação que chega ao painel sem interferências;

Difusa (R_{DIF}) – radiação que chega ao painel após ser difundida;

Albedo ou refletida (R_A) – radiação que chega ao painel proveniente do meio envolvente.

2.2.2.2 Índice de claridade atmosférica

O índice de claridade atmosférica, K_T , é a razão entre a radiação solar que incide na superfície terrestre (G), resultante do somatório das radiações direta e difusa e da radiação solar extraterrestre (S_D). Este valor pode ser determinado através da equação 2.6 (Andrade, et al., 2018).

$$K_T = \frac{G}{S_D} \quad (2.6)$$

Para cada cidade em estudo foi obtido o valor do índice de claridade médio mensal, ver tabela 3, através dos dados disponibilizados pelo Centro de Informações de Ciência

Atmosférica (*Atmospheric Science Data Center - ASDC*)¹ da NASA, para os anos entre 1983 e 2005.

Tabela 3 - índices de claridade para as cidades em estudo.

Índice de claridade (K_T)							
Meses	Bragança	Viana do Castelo	Porto	Castelo Branco	Lisboa	Évora	Faro
Janeiro	0,45	0,46	0,46	0,50	0,52	0,52	0,53
Fevereiro	0,50	0,50	0,50	0,51	0,55	0,53	0,55
Março	0,53	0,53	0,53	0,54	0,59	0,56	0,57
Abril	0,51	0,56	0,56	0,54	0,61	0,55	0,57
Mai	0,54	0,57	0,57	0,55	0,61	0,56	0,58
Junho	0,62	0,61	0,61	0,63	0,62	0,63	0,65
Julho	0,65	0,62	0,62	0,67	0,64	0,66	0,68
Agosto	0,64	0,61	0,61	0,65	0,65	0,65	0,67
Setembro	0,58	0,57	0,57	0,59	0,62	0,59	0,61
Outubro	0,47	0,50	0,50	0,50	0,57	0,51	0,53
Novembro	0,44	0,46	0,46	0,47	0,52	0,49	0,51
Dezembro	0,42	0,43	0,43	0,46	0,49	0,48	0,49

2.2.2.3 Razão entre a radiação difusa e radiação global

Liu e Jordan (1977) desenvolveram uma correlação, equação 2.7, equação que relaciona a radiação difusa, a radiação total que chega a uma superfície horizontal e o índice de claridade, esta permite fazer uma estimativa dos valores médios mensais da radiação incidente. Os resultados obtidos neste estudo são valores diários (d) e diários médios mensais (dm).

$$\frac{R_{DIF}^{dm}}{G^{dm}} = 1,390 - 4,027K_T + 5,531K_T^2 - 3,108K_T^3 \quad (2.7)$$

¹ Disponível em "[https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/grid.cgi?email="](https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/grid.cgi?email=)".

Posteriormente em 1979 Collares-Pereira e Rabl estudaram a correlação e introduziram o ângulo horário do pôr do Sol, resultando na correlação expressa na equação 2.8 (Kalogirou, 2009).

$$\frac{R_{DIF}^{dm}}{G^{dm}} = 0,775 + 0,00653(H_{SS} - 90) - [0,505 + 0,00455(H_{SS} - 90)] \cos(111K_T - 103) \quad (2.8)$$

2.2.3 Radiação solar que incide sobre uma superfície inclinada pousada na superfície terrestre

Na instalação de um painel solar é dada uma inclinação ao painel, pelo que, torna-se necessário saber a energia que chega a uma superfície inclinada face à energia incidente em superfícies horizontais.

A radiação diária média mensal incidente numa superfície inclinada (R^{dm}), relaciona-se com a radiação total sobre uma superfície inclinada (I_β) e a radiação global numa superfície horizontal (G_h) e pode ser avaliada considerando separadamente as três componentes da radiação, direta, difusa e albedo que atinge a superfície da Terra. Através da equação 2.9 esse valor pode ser obtido para cada mês em função da inclinação (Kalogirou, 2009).

$$R^{dm} = \left(1 - \frac{R_{DIF}^{dm}}{G_h^{dm}}\right) R_{DIR} + \frac{R_{DIF}^{dm}}{G_h^{dm}} \left(\frac{1 + \cos \beta}{2}\right) + \rho \left(\frac{1 - \cos \beta}{2}\right) \quad (2.9)$$

A radiação que incide diretamente numa superfície é dada pela parcela na expressão 2.10, que relaciona o quociente da radiação difusa com a radiação global e a radiação que incide diretamente numa superfície pousada na Terra com uma determinada inclinação.

$$\left(1 - \frac{R_{DIF}^{dm}}{G_h^{dm}}\right) R_{DIR} \quad (2.10)$$

O valor de R_{DIR} para uma superfície pousada no hemisfério Norte com inclinação direcionada para Sul é dado pela equação 2.11,

$$R_{DIR} = \frac{\cos(\varphi - \beta) \cos \delta \sin H_{min} + (\pi/180)H_{min} \sin(\varphi - \beta) \sin \delta}{\cos \varphi \cos \delta \sin H_{ss} + (\pi/180)H_{min} \sin \varphi \sin \delta} \quad (2.11)$$

onde H_{min} é o ângulo do pôr do Sol mínimo para uma superfície inclinada entre o valor de H_{ss} e o valor de $\cos^{-1}[-\tan(\varphi - \beta)\tan\delta]$ e é dado pela equação 2.12.

$$H_{min} = \min \left[H_{ss} \times \frac{\pi}{180}; \cos^{-1}[-\tan(\varphi - \beta)\tan\delta] \right] \quad (2.12)$$

A radiação difusa é dado pela parcela na expressão 2.13, onde é relacionado o quociente da radiação difusa com a radiação global com o ângulo de inclinação da superfície em relação à horizontal (β).

$$R_{DIF} = \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) \quad (2.13)$$

A radiação albedo é dado pela parcela na expressão 2.14,

$$R_A = \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (2.14)$$

em que β corresponde ao ângulo de inclinação da superfície em relação à horizontal e ρ o valor correspondente à reflexão do solo (Kalogirou, 2009). Para o presente caso de estudo a reflexão do solo assume o valor de 0,1.

2.2.4 Painel solar plano

Os painéis solares podem ser distinguidos em dois tipos, os não concentradores, planos, ou concentradores, superfície concava, e os não estacionário, orientam-se pela posição do sol, ou estacionários, que são fixados permanentemente numa posição (Kalogirou, 2009). Para o caso em estudo será utilizado uma painel solar plano e estacionário.

Para um aproveitamento otimizado da energia proveniente da radiação solar, a superfície sobre a qual a radiação incide deve ser capaz de absorver o máximo da energia e consequentemente que esta seja totalmente fornecida ao fluido (geralmente ar, água

ou óleo) que se pretende aquecer. Deve assim ser garantido que as perdas dessa energia por condução, convecção ou radiação para o meio exterior sejam minimizadas. O painel solar deve assim ser constituído por uma superfície que possua uma elevada absorção de modo a maximizar a captação de energia solar incidente (cujos comprimentos de onda são reduzidos, estando na ordem dos 0,3 a 3,0 μm), ser isolado termicamente e possuir baixa emissão para os comprimentos de onda da radiação própria (cujos valores variam entre 3,0 a 30 μm) (Roriz, et al., 2010).

A figura 10 mostra um corte de um painel solar plano, com a indicação dos principais componentes. Este é assim constituído por uma caixa termicamente isolada, de modo a reduzir as perdas de calor para o exterior, uma cobertura transparente de elevada transmissibilidade e baixa reflexão, placa absorvedora que absorve a radiação solar e posteriormente transfere a energia térmica para o fluido que circula nos tubos de transferência de calor (Roriz, et al., 2010).



Figura 10 - Componentes de um painel solar plano. Fonte: Roriz (2010) – adaptada.

Quando a radiação solar incide na superfície do painel solar, parte dessa radiação é refletida, parte é absorvida e outra parte é transmitida. A transmissividade da cobertura transparente é designada por τ e a absorção da placa absorvedora é designada por α . Estas duas propriedades em função da direção e comprimento de onda da radiação incidente são designadas respetivamente por τ_n e α_n (Kalogirou, 2009).

Para definir o desempenho de um sistema com painéis solares térmicos é importante perceber os seguintes parâmetros:

A fração solar, que representa a porcentagem de energia que é utilizada no aquecimento de água;

O rendimento global do sistema, que corresponde à porcentagem de radiação que incide no painel e é utilizada no aquecimento de água;

A produtividade, que corresponde à energia anual por unidade de área do coletor e que é aproveitada para o aquecimento de água (Roriz, et al., 2010).

Para a previsão do desempenho de um coletor solar é necessário saber a energia absorvida pela placa absorvedora. Esta é definida pelo soma das três componentes da radiação multiplicadas pelo produto entre a transmissividade da cobertura e absorvidade da placa absorvedora em função do ângulo de incidência da radiação no painel solar (θ) (Kalogirou, 2009). Através da equação 2.15 é obtido o valor para a radiação solar absorvida.

$$I_{\beta}(\tau\alpha) = R_{DIR}S_h(\tau\alpha)_{DIR} + R_{DIF}D_h(\tau\alpha)_{DIF} + \rho G_h R_A(\tau\alpha)_A \quad (2.15)$$

De modo a facilitar a determinação do produto $(\tau\alpha)$ e em função do ângulo incidente da radiação, Klein (1979) desenvolveu uma relação entre $(\tau\alpha) / (\tau\alpha)_n$ e θ em função do número de coberturas de vidro que o painel tem. Essa relação está representada na figura 11 (Duffie, et al., 2013).

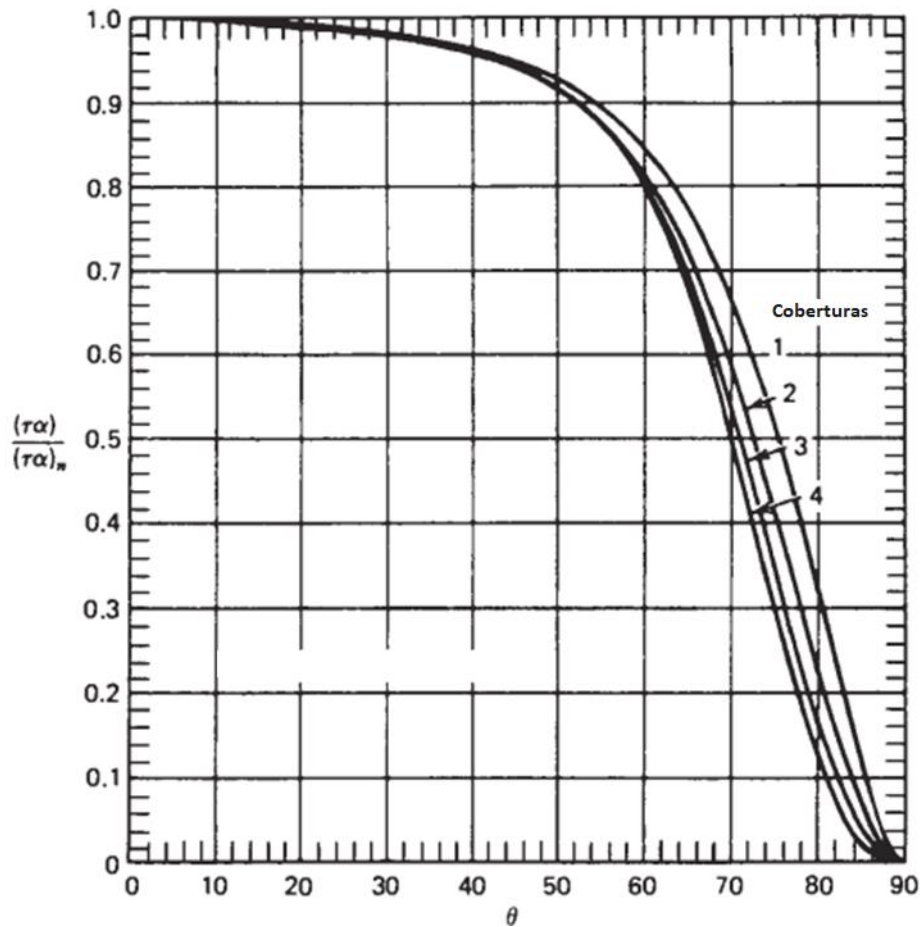


Figura 11 - Coeficiente de transmissão e coeficiente de absorção em função do ângulo de incidência. Fonte: (Duffie, et al., 2013) - adaptada.

Segundo os mesmos autores, os valores obtidos através da figura 11 são basicamente os mesmos que obtidos de forma independente. O ângulo de incidência da radiação no painel solar pode ser aproximado a um valor médio diário para cada mês, do ângulo para o qual a radiação incide no painel duas horas e meia após o meio dia solar. O valor de θ pode ser obtido através do gráfico apresentado na figura 12 em função do local e da inclinação do painel em relação à superfície terrestre (Duffie, et al., 2013).

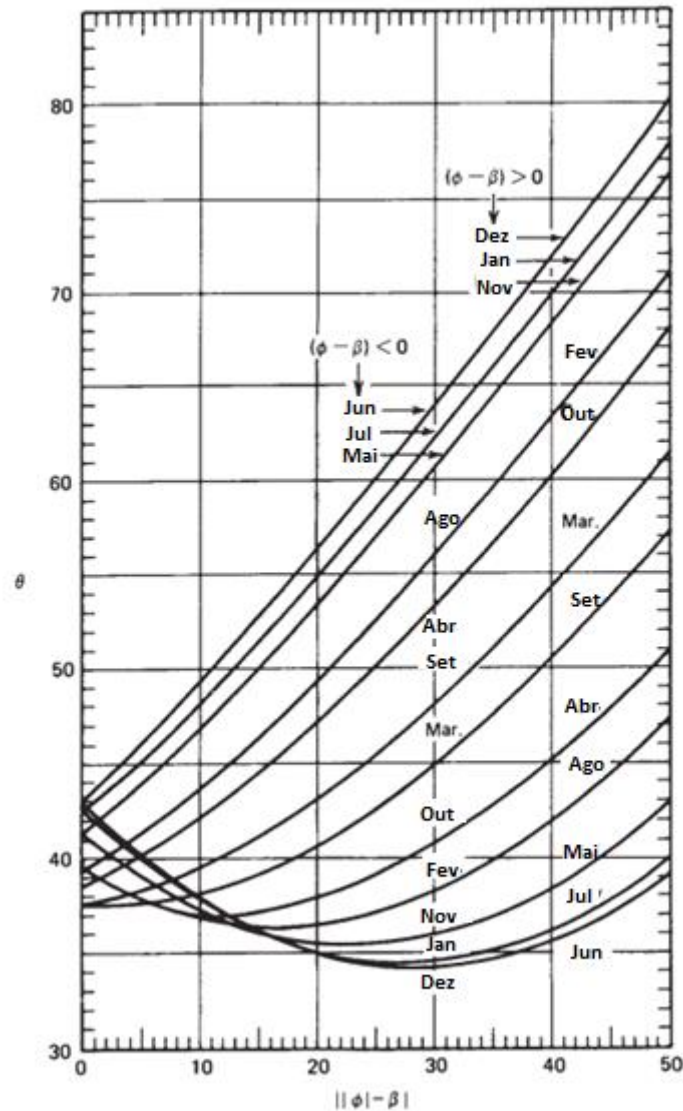


Figura 12 - Ângulo de incidência médio mensal. Fonte: (Duffie, et al., 2013).

2.2.4.1 Perdas de energia associadas ao painel

O desempenho de um painel solar em modo estacionário baseia-se num balanço de energia entre três fatores, a conversão da energia solar em energia útil, perdas térmicas e perdas óticas. A radiação diária média mensal incidente numa superfície inclinada por unidade de área do absorvedor é definida pela equação já descrita 2.9 e essa traduz a energia útil. As perdas térmicas do painel para a vizinhança por condução, convecção e radiação, podem ser traduzidas pelo produto do coeficiente geral de perda de calor (U_L) pela diferença entre a temperatura média da placa absorvedora (T_{abs}) e a temperatura

ambiente (T_a) (Duffie, et al., 2013). Posto isto, a perda total associada a um painel solar, pode ser expressa pela equação 2.16 (Kalogirou, 2009).

$$Q_p = U_L A_c (T_{abs} - T_a) \quad [W] \quad (2.16)$$

Onde,

A_c – área do painel solar [m^2];

T_{abs} – designa a temperatura da placa absorvedora [$^{\circ}C$];

T_a – temperatura do ar [$^{\circ}C$];

U_L – coeficiente global de perdas de calor [$W/(m^2 \cdot ^{\circ}C)$].

O coeficiente global de perdas de calor é dado pela soma de três tipos de perdas associadas ao painel e é expresso pela equação 2.17.

$$U_L = U_a + U_d + U_o \quad (2.17)$$

Onde,

U_a – coeficiente de perdas de calor no sentido superior [$W/(m^2 \cdot ^{\circ}C)$];

U_d – coeficiente de perdas de calor no sentido inferior [$W/(m^2 \cdot ^{\circ}C)$];

U_o – coeficiente de perdas de calor das bordas [$W/(m^2 \cdot ^{\circ}C)$].

2.3 Descrição do caso de estudo

O caso de estudo passa pelo estudo da utilização de um sistema solar térmico no fornecimento de calor a um fluido térmico, utilizado como fonte de calor para um sistema de refrigeração por absorção. Para isso foi necessário o estudo prévio do potencial solar na implementação deste sistema e avaliação das temperaturas do fluido térmico. Foi utilizado o método da fração solar, que relaciona a energia fornecida pelo Sol aos painéis solares térmicos e a energia necessária para satisfazer as necessidades de funcionamento do sistema de refrigeração por absorção LiBr/H₂O. Primeiramente foi feito o cálculo dos ganhos solares mensais para cada cidade em estudo, para posterior aplicação no método da fração solar. Seguidamente foi feito o cálculo da potência associada ao gerador, onde foi estipulado um valor para a potência do evaporador do

sistema e fazendo variar as temperaturas do gerador e condensador obteve-se o valor da potência associada ao gerador. Para potência do gerador foi calculada a eficiência do sistema em função da variação das temperaturas do gerador e absorvedor.

2.3.1 Sistema de refrigeração solar

Para o estudo do ciclo frigorífico de absorção o sistema utilizado foi de simples efeito e está esquematizado na figura 13.

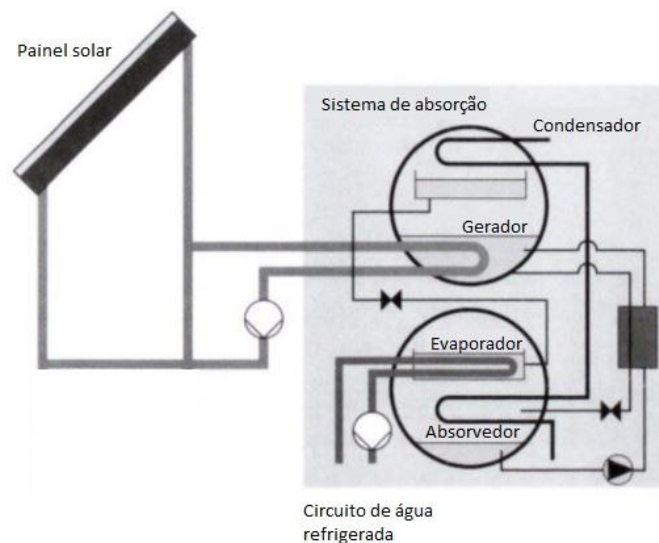


Figura 13 - Esquema de um sistema de refrigeração solar. Fonte (Roriz, et al., 2010) – adaptada.

A temperatura necessária no gerador para os sistemas de refrigeração por absorção, que trabalham com a mistura LiBr/H₂O está entre os 70°C e 95°C (Ketfi, et al., 2015). Para os cálculos do caso em estudo foi utilizado um painel solar de placa plana da marca Vulcano, modelo WarmSun FKC-2S, ver anexo 6.3.

Segundo a ficha técnica do painel solar disponível na página oficial da Vulcano, este possui as seguintes características:

- Acabamento altamente seletivo com absorvedor em alumínio;
- Instalação na vertical;
- Circuito hidráulico em grelha de tubos;
- Permite ligação hidráulica em paralelo de canais até 10 coletores;
- Estrutura em SMC de uma só peça;

Vidro solar estruturado;

Ligações flexíveis em borracha.

Este sistema encontra-se certificado pela DIN CERTO e possui as características técnicas apresentadas na tabela 4.

Tabela 4 – Características técnicas do painel solar WarmSun FKC-2S. Fonte (Vulcano, 2018)

WarmSun FKC-2S		
Dimensões: AxLxP	2017x1175x87	mm
Área total	2,37	m ²
Área de abertura	2,25	m ²
Área do absorvedor	2,18	m ²
Fator de eficiência (η)	0,766	-
Coefficiente de perdas lineares (a_1)	3,216	W/(m ² K)
Coefficiente de perdas lineares (a_2)	0,015	W/(m ² K)

As perdas lineares (a_1) traduz-se na equação 2.7, onde F' é o fator de eficiência do painel e U_L as perdas de potência associadas ao painel.

$$a_1 = F'U_L \quad (2.7)$$

O fator de eficiência corresponde ao rendimento associado ao painel solar térmico (η_0), energia absorvida pelo painel, equação 2.8 e está relacionado com o fator de eficiência e produto entre o coeficiente transmissão e o coeficiente de absorção medidos na normal ao painel solar.

$$\eta_0 = F'(\tau\alpha)_n, \quad (W/m^2K) \quad (2.8)$$

Estes dois parâmetros definidos nas equações 2.7 e 2.8 são utilizados no método da fração solar.

2.4 Método da fração solar ou *f-chart*

O método da fração solar foi desenvolvido por Klein *et al.* (1976 e 1977) e Beckaman *et al.* (1977), resultado de uma correlação dos valores obtidos entre muitas centenas de simulações de desempenho térmico de um sistema de aquecimento solar. Este método permite estimar a potência térmica proveniente do Sol captada por um painel solar

térmico, ou seja, a quantidade de calor que um painel solar térmico pode fornecer a um determinado sistema de aquecimento solar (Baig, et al., 2016).

Para aplicação do método da fração solar é importante analisar alguns parâmetros, nomeadamente o produto entre o fator de remoção de calor e a área do painel solar ($F'_R A_c$), as perdas de potência associadas ao painel (U_L), a sua inclinação (β) e as perdas térmicas globais do painel solar ($(UA)_h$). Este método deve ser aplicado para os intervalos de parâmetros que estão na tabela 5 (Duffie, et al., 2013).

Tabela 5 - Parâmetros de cálculo do método da fração solar.

$0,6 \leq (\tau\alpha)_n \leq 0,9$
$5 \leq F'_R A_c \leq 120 [m^2]$
$2,1 \leq U_L \leq 8,3 [W/m^2\text{°C}]$
$30 \leq \beta \leq 90 [^\circ]$
$83 \leq (UA)_h \leq 667 [W/\text{°C}]$

O método dá-nos as frações solares em função de dois parâmetros adimensionais X e Y. Um diz respeito à relação entre as perdas do painel e as cargas térmicas (X) e o outro à proporção de radiação solar absorvida pelas cargas térmicas (Y) (Duffie, et al., 2013).

2.4.1 Parâmetros adimensionais X e Y

Os dois parâmetros adimensionais obtidos segundo as correlações 2.9 e 2.10, estes são usados nas simulações de sistemas com um painel solar com foco no desenvolvimento de correlações entre estes e a fração solar de carga térmica (f) (Duffie, et al., 2013).

$$X = F_R U_L \frac{F'_R}{F_R} (T_{ref} - T_a) \Delta t \frac{A_c}{CT_m} \quad (2.9)$$

$$Y = F_R (\tau\alpha)_n \frac{F'_R}{F_R} \frac{(\tau\alpha)}{(\tau\alpha)_n} I_\beta n_m \frac{A_c}{CT_m} \quad (2.10)$$

Onde:

A_C – área do painel solar (m^2);

U_L – representa o coeficiente global de perdas de calor no painel solar ($W/m^2 \cdot ^\circ C$);

Δt – total de segundos do mês;

T_a – temperatura ambiente média mensal ($^\circ C$);

T_{ref} – temperatura de referência ($100^\circ C$);

n_m – número de dias do mês;

CT_m – cargas térmicas mensais (J);

F_R – fator de remoção de calor do coletor;

F'_R – fator de eficiência do painel com um permutador de calor;

$(\tau\alpha)$ – produto entre o coeficiente de transmissão e o coeficiente de absorção;

$(\tau\alpha)_n$ – produto entre o coeficiente de transmissão e o coeficiente de absorção medidos na normal ao painel solar;

I_β – Irradiação média mensal incidente num painel por unidade de área (J/m^2);

$F_R U_L$ e $F_R (\tau\alpha)_n$ – Estes produtos são obtidos através das características de teste do painel solar térmico.

As cargas térmicas mensais do sistema em estudo traduz-se na potência térmica necessária ao gerador presente no sistema .

A fração solar média mensal do sistema onde o fluido de trabalho é líquido obtém-se pela correlação 2.11. A relação entre os parâmetros adimensionais e a fração solar é mostrada na figura 14 (Duffie, et al., 2013).

$$f = 1,029Y - 0,065X - 0,245Y^2 + 0,0018X^2 + 0,0215Y^3 \quad (2.11)$$

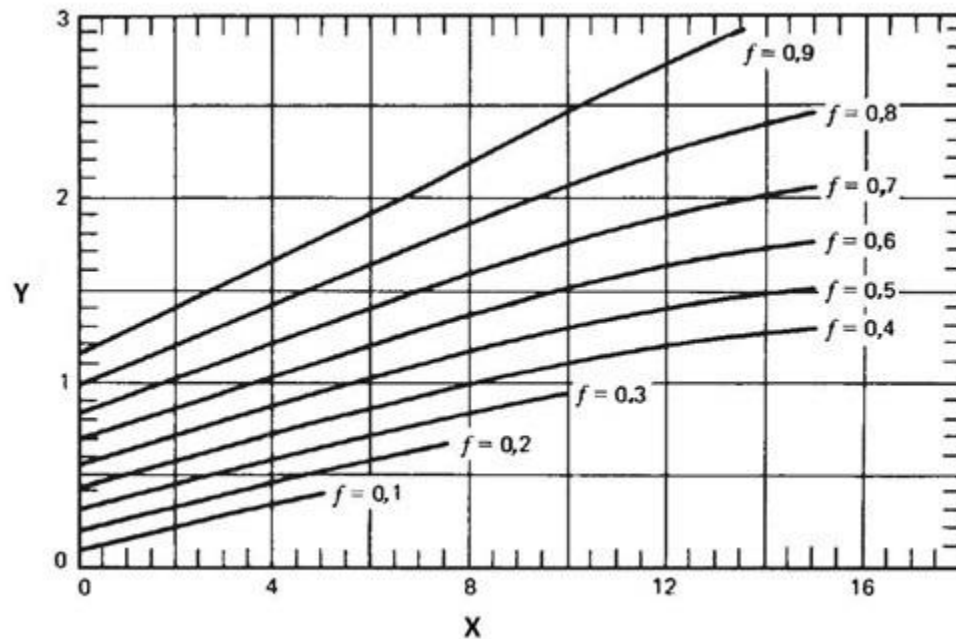


Figura 14 - Fração solar (f) em função dos parâmetros adimensionais X e Y . Fonte (Duffie, et al., 2013) – adaptada.

Os parâmetros adimensionais tomam valores que variam entre $0 < Y < 3$ e $0 < X < 18$, no caso da fração solar os valores obtidos através das correlações caso sejam maiores de 1, adota-se o valor de $f=1$.

2.4.2 Temperatura ambiente média mensal das cidades em estudo

Os valores das temperaturas ambiente médias mensais das cidades em estudo foram obtidas após consulta da plataforma virtual *World Meteorological Organization*, baseados em médias mensais para o período de 30 anos, entre 1971 e 2000. Na tabela 6 estão expostos esses valores.

Tabela 6 - Temperatura ambiente média mensal das cidades em estudo.

Temperatura média mensal do ar - Ta (°C)							
Meses	Bragança	Viana do Castelo	Porto	Castelo Branco	Lisboa	Évora	Faro
Janeiro	4,40	9,53	9,30	7,88	11,32	9,31	11,84
Fevereiro	6,26	10,53	10,38	9,63	12,60	10,40	12,69
Março	8,62	12,06	11,96	12,76	14,33	12,43	14,17
Abril	10,18	13,40	13,19	13,09	15,36	13,50	15,46
Mai	13,48	15,44	15,24	17,03	17,38	16,19	17,74
Junho	17,90	18,59	18,30	21,06	20,38	20,22	20,97
Julho	21,31	20,58	20,27	25,08	22,72	23,29	23,68
Agosto	21,14	20,29	20,12	24,43	22,98	23,36	23,66
Setembro	18,14	18,88	18,95	21,03	21,76	21,40	22,02
Outubro	12,84	15,75	15,96	16,15	18,38	17,05	18,79
Novembro	8,23	12,49	12,60	11,77	14,77	13,01	15,44
Dezembro	5,55	10,70	10,60	9,07	12,37	10,40	13,21

2.4.3 Parâmetros de cálculo do método da fração solar associados ao painel solar térmico

Como já referido anteriormente os valores do produto dos parâmetros $F_R U_L$ e $F_R (\tau\alpha)_n$ são obtidos através das características de teste do painel solar térmico, este estão descritos na ficha de certificação do painel. Visitando a página da *Solar Keymark*, marca de certificação voluntária para produtos solares térmico, encontramos os certificados de conformidade de diferentes produtos testados e avaliados segundo os parâmetros padrão europeus.

Através das equações 2.7 e 2.8, obtém-se o valor do fator de eficiência e o coeficiente de perdas, utilizados no cálculo do fator de remoção de calor traduzido na equação 2.12.

$$F_R = \frac{m_f c_p}{A_c U_L} \left[1 - e^{-\left(\frac{A_c U_L F'}{m_f c_p}\right)} \right] \quad (2.12)$$

Onde:

m_f – fluxo mássico (kg/s/m²);

c_p – calor específico (J/kgK).

2.4.4 Parâmetros adicionais para a aplicação do método da fração solar

Para o caso de estudo foram feitas algumas considerações para os cálculos efetuados. Neste capítulo serão dispostas essas mesmas considerações, tendo em conta o sistema de refrigeração por absorção e o método da fração solar. A temperatura máxima do gerador está limitada pela temperatura da água que sai dos painéis solares, inferior a 100°C.

A temperatura de saída da água do painel solar térmico será considerada em função da temperatura do gerador do sistema de refrigeração. A razão F'_R/F_R será considerada como sendo 1, pois no conjunto do sistema solar não existe permutador de calor. Por último a taxa de fluxo, fluxo mássico, utilizado no teste do painel foi de 0,023 (kg/s).

DESENVOLVIMENTO E RESULTADOS

- 3.1 VALORES DOS ÂNGULOS HORÁRIOS DO PÔR DO SOL
- 3.2 VALORES DA RADIAÇÃO INCIDENTE
- 3.3 RADIAÇÃO GLOBAL DIÁRIA MÉDIA MENSAL
- 3.4 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DA IRRADIAÇÃO INCIDENTE EM UMA SUPERFÍCIE INCLINADA SEGUNDO OS DADOS OBTIDOS PELA NASA
 - 3.5 COMPARAÇÃO DA IRRADIAÇÃO EM FUNÇÃO DO ÂNGULO DE INCLINAÇÃO
 - 3.6 CÁLCULO DA POTÊNCIA TÉRMICA ASSOCIADA AO GERADOR
 - 3.6.1 CASO DE ESTUDO 1
 - 3.6.2 CASO DE ESTUDO 2
 - 3.6.3 CASO DE ESTUDO 3
 - 3.6.4 CASO DE ESTUDO 4
 - 3.7 VALORES OBTIDOS PARA A POTÊNCIA ASSOCIADA AO GERADOR
 - 3.8 APLICAÇÃO DO MÉTODO DA FRAÇÃO SOLAR
 - 3.8.1 RESULTADOS PARA A CIDADE DE BRAGANÇA
 - 3.8.2 RESULTADOS PARA A CIDADE DE CASTELO BRANCO
 - 3.8.3 RESULTADOS PARA A CIDADE DE ÉVORA
 - 3.8.4 RESULTADOS PARA A CIDADE DE FARO
 - 3.8.5 RESULTADOS PARA A CIDADE DE LISBOA
 - 3.8.6 RESULTADOS PARA A CIDADE DE PORTO
 - 3.8.7 RESULTADOS PARA A CIDADE DE VIANA DO CASTELO
 - 3.9 ESTUDO ECONÓMICO
 - 3.9.1 CUSTO DO SISTEMA
 - 3.9.2 CUSTO DA ENERGIA ELÉTRICA EM PORTUGAL
 - 3.9.3 RESULTADOS DA ECONOMIA ANUAL E DO PRI

3 DESENVOLVIMENTO

Neste capítulo é feita a apresentação e análise dos resultados obtidos para o estudo da presente dissertação. Inicialmente apresentam-se os valores das variáveis envolvidas no cálculo da irradiação recebida pelo painel solar térmico e uma análise do melhor ângulo de inclinação do mesmo, para cada cidade de estudo. Posteriormente será apresentado o cálculo da potência térmica necessária ao gerador que pode ser obtida por energia solar. Estudou-se também o impacto da variação das temperaturas do gerador e absorvedor sobre a potência que pode ser obtida via solar. Com isto será apresentado os valores obtidos para a fração solar e consequente estudo da viabilidade do sistema. Todos os valores apresentados são um resumo dos resultados obtidos, pelo que, nos anexos estão as tabelas que serviram como base cálculo aos resultados obtidos.

3.1 Valores dos ângulos horários do pôr do Sol

Neste subcapítulo são apresentados os valores obtidos dos ângulos horários do pôr do Sol para as cidades em estudo. O gráfico da figura 15 foi construído com base na expressão 2.3, com o valor da latitude obtido da tabela 1 e os valores da declinação com base na equação 2.2 para um valor de n segundo descrito por Duffie e Bekman (2013). Os valores dos ângulos horários para cada cidade em estudo, encontram-se tabelados no anexo 6.1.

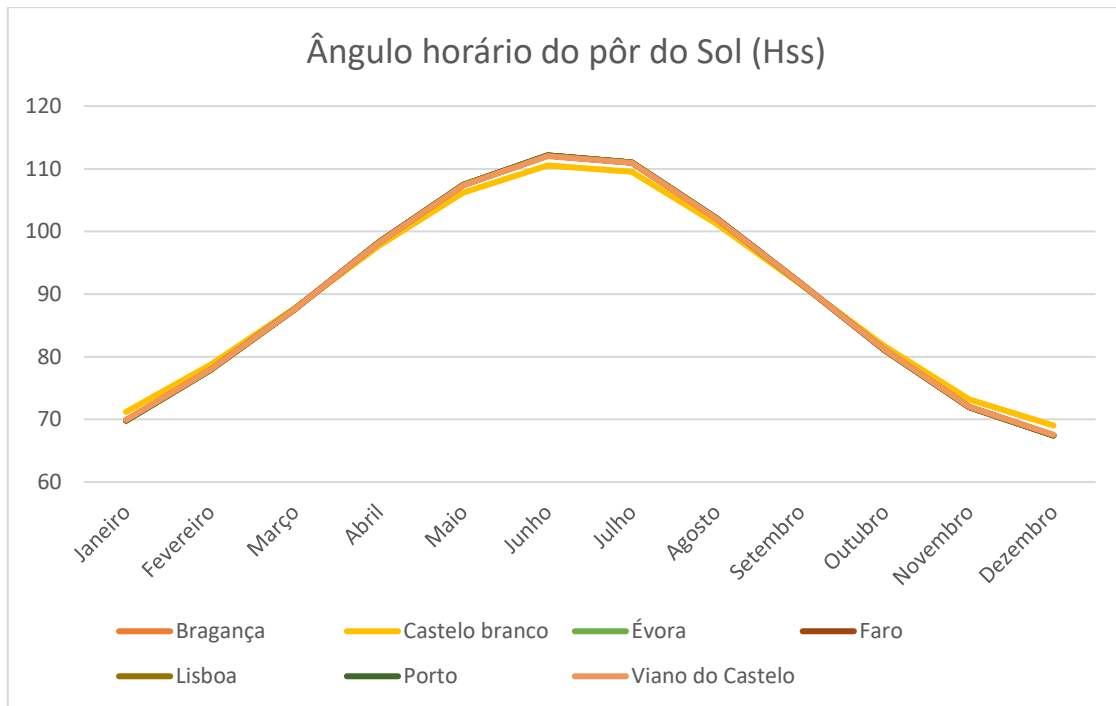


Figura 15 - Valores médios diários mensais obtidos para o ângulo horário do pôr do Sol para cada cidade. Dados do anexo 6.1.

Os valores do ângulo horário do pôr do Sol para as cidades em estudo são muito próximos uns dos outros. Sendo cidades pertencentes ao mesmo País e não estando geograficamente muito afastadas, justificam-se estes valores.

3.2 Valores da radiação incidente

Neste ponto são apresentados os valores da radiação média diária que incide numa superfície plana colocada fora da atmosfera terrestre, figura 16. O valor da radiação incidente foi obtido através da equação 2.5, sendo que a latitude é das cidades que estão definidas na tabela 1, a declinação média mensal do Sol foi calculada para os dias referidos na tabela 2 e o ângulo horário do pôr do sol está descrito no ponto anterior, 3.1.

Os valores da radiação incidente para cada cidade em estudo, encontram-se tabelados no anexo 6.1.

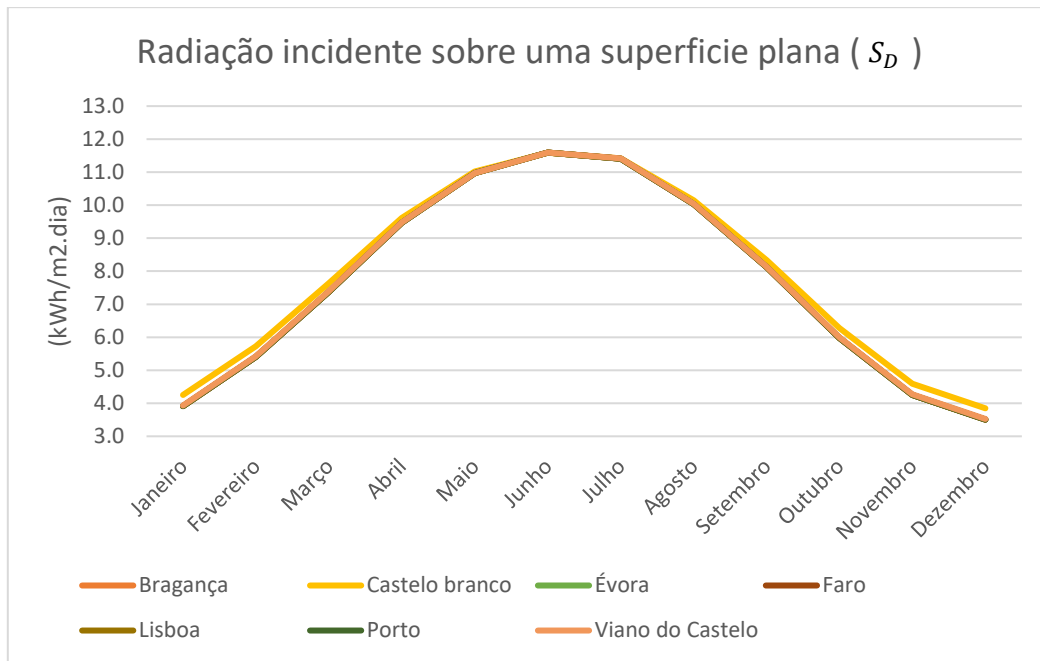


Figura 16 - Radiação média diária mensal incidente numa superfície plana em cada cidade. Dados do anexo 6.1.

Mais uma vez não há uma variação significativa dos valores obtidos para as cidades em estudo. Pelos mesmos motivos anteriormente dispostos, estes valores são aceitáveis.

3.3 Radiação global diária média mensal

De seguida serão analisados os valores obtidos para a radiação global diária média mensal para cada uma das cidades em estudo, figura 17. Este valor foi obtido com base na equação 2.6, em que os valores do índice de claridade estão expostos na tabela 3 e os valores da radiação incidente estão no ponto anterior 3.2.

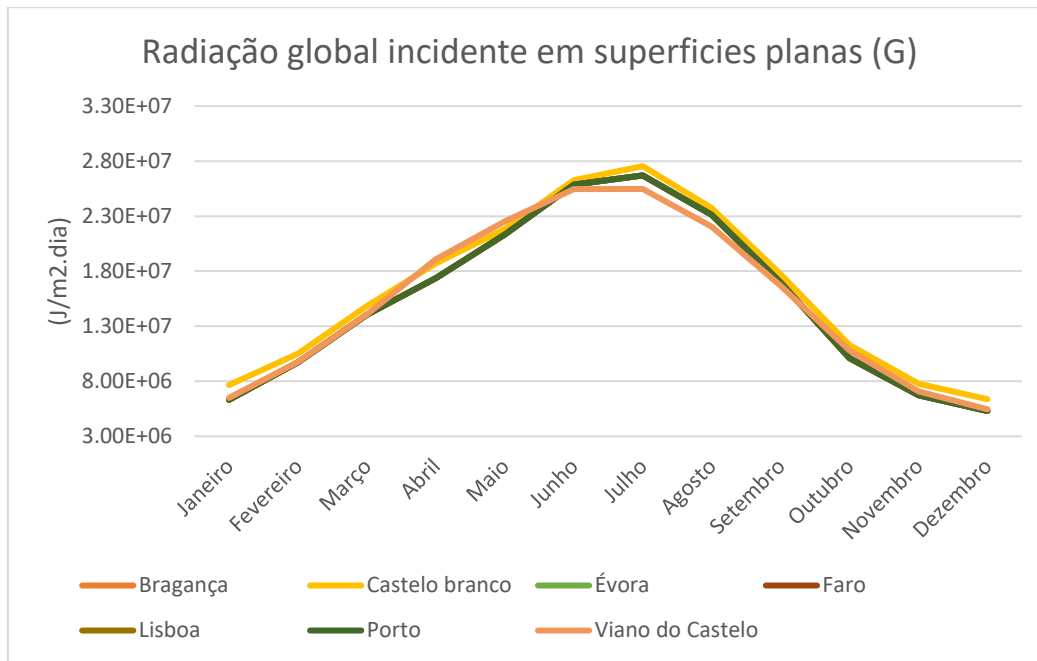


Figura 17 - Radiação global diária média mensal incidente em superfícies planas para cada cidade.

Os valores da radiação global incidente numa superfície plana depende do índice de claridade médio mensal, valores exposto no capítulo anterior. Sendo os valores do índice de claridade para cada cidade muito semelhantes, os valores obtidos para a radiação global são igualmente muito próximos entre cada cidade em estudo.

3.4 Comparação dos resultados da irradiação incidente em uma superfície inclinada segundo os dados obtidos pela NASA

Os valores calculados e expostos nas tabelas seguintes, foram comparados com os resultados disponibilizados no Centro de Informações de Ciência Atmosférica (Atmospheric Science Data Center - ASDC)² da National Aeronautics and Space Administration (NASA), com a finalidade de avaliar as possíveis diferenças. Para cada cidade foram comparados os valores da irradiação média mensal incidente numa superfície em função do ângulo de inclinação (β). O valor de I_{β} calculado foi obtido foi

² Disponível em "<https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/grid.cgi?email=>".

através do produto da radiação solar que incide numa superfície terrestre (G), com a radiação solar extraterrestre que incide sobre uma superfície horizontal (S_{oh}^d) em função do ângulo de inclinação para cada cidade em estudo.

Para a cidade de Bragança os valores referenciados pelo ASDC foram para inclinações de 0° , 26° , 41° e 56° . As tabelas 7 e 8 apresentam os valores calculados e os disponibilizados pela NASA.

Tabela 7 - Comparação dos valores de irradiação para diferentes inclinações na cidade de Bragança - Parte 1.

Bragança	I_β	I_β ASDC	I_β	I_β ASDC
	kWh/(m ² .dia)	kWh/(m ² .dia)	kWh/(m ² .dia)	kWh/(m ² .dia)
	0°		26°	
Janeiro	1,35	1,80	1,55	2,74
Fevereiro	2,19	2,71	2,51	3,70
Março	3,30	4,04	3,76	4,90
Abril	4,07	4,94	4,59	5,29
Mai	4,88	5,99	5,52	5,97
Junho	4,95	7,22	6,32	6,88
Julho	5,45	7,33	6,67	7,20
Agosto	5,25	6,50	6,07	6,83
Setembro	3,95	4,76	4,53	5,58
Outubro	2,36	2,92	2,66	3,77
Novembro	1,59	1,92	1,73	2,79
Dezembro	1,15	1,52	1,29	2,37

Tabela 8 - Comparação dos valores de irradiação para diferentes inclinações na cidade de Bragança - Parte 2.

Bragança	I_{β}	I_{β} ASDC	I_{β}	I_{β} ASDC
	kWh/(m ² .dia)	kWh/(m ² .dia)	kWh/(m ² .dia)	kWh/(m ² .dia)
	41°		56°	
Janeiro	1,56	3,09	1,50	3,27
Fevereiro	2,53	4,01	2,42	4,09
Março	3,76	5,05	3,58	4,94
Abril	4,59	5,14	4,35	4,73
Mai	5,50	5,56	5,18	4,88
Junho	6,57	6,26	6,40	5,33
Julho	6,82	6,60	6,56	5,66
Agosto	6,10	6,52	5,80	5,86
Setembro	4,55	5,65	4,33	5,41
Outubro	2,66	4,00	2,52	4,03
Novembro	1,69	3,09	1,57	3,23
Dezembro	1,29	2,70	1,22	2,88

Analisando os valores obtidos, a maior diferença entre os resultados é de 58%. Este valor é referente ao mês de dezembro para uma inclinação de 56°.

Para a cidade de Castelo Branco os valores referenciados pelo ASDC foram para inclinações de 0°, 24°, 39° e 54°. As tabelas 9 e 10 apresentam os valores calculados e os disponibilizados pela NASA.

Tabela 9 - Comparação dos valores de irradiação para diferentes inclinações na cidade de Castelo Branco - Parte 1.

Castelo Branco	I_{β}	I_{β} ASDC	I_{β}	I_{β} ASDC
	kWh/(m ² .dia)	kWh/(m ² .dia)	kWh/(m ² .dia)	kWh/(m ² .dia)
	0°		24°	
Janeiro	1,67	2,17	1,89	3,24
Fevereiro	2,45	2,95	2,75	3,90
Março	3,54	4,24	3,97	5,04
Abril	4,23	5,23	4,88	5,56
Mai	4,34	6,13	5,39	6,09
Junho	6,17	7,30	6,81	7,04
Julho	6,11	7,56	7,03	7,40
Agosto	5,48	6,67	6,25	6,95
Setembro	4,18	4,94	4,74	5,68
Outubro	2,69	3,21	2,99	4,07
Novembro	1,76	2,24	1,96	3,17
Dezembro	1,41	1,81	1,56	2,75

Tabela 10 - Comparação dos valores de irradiação para diferentes inclinações na cidade de Castelo Branco - Parte 2.

Castelo Branco	I_{β}	I_{β} ASDC	I_{β}	I_{β} ASDC
	kWh/(m ² .dia)	kWh/(m ² .dia)	kWh/(m ² .dia)	kWh/(m ² .dia)
	39°		54°	
Janeiro	1,91	3,69	1,82	3,92
Fevereiro	2,75	4,23	2,61	4,32
Março	3,99	5,21	3,79	5,09
Abril	4,96	5,41	4,79	4,98
Mai	5,64	5,68	5,56	4,99
Junho	6,71	6,40	6,25	5,45
Julho	7,07	6,78	6,70	5,81
Agosto	6,29	6,63	5,98	5,97
Setembro	4,77	5,76	4,55	5,52
Outubro	2,99	4,34	2,83	4,37
Novembro	1,96	3,54	1,87	3,72
Dezembro	1,56	3,15	1,48	3,37

Analisando os valores obtidos, a maior diferença entre os resultados é de 56%. Este valor é referente ao mês de dezembro para uma inclinação de 54°.

Para a cidade de Évora os valores referenciados pelo ASDC foram para inclinações de 0°, 23°, 38° e 53°. As tabelas 11 e 12 apresentam os valores calculados e os disponibilizados pela NASA.

Tabela 11 - Comparação dos valores de irradiação para diferentes inclinações na cidade de Évora - Parte 1.

Évora	I_{β}	I_{β} ASDC	I_{β}	I_{β} ASDC
	kWh/(m ² .dia)	kWh/(m ² .dia)	kWh/(m ² .dia)	kWh/(m ² .dia)
	0°		23°	
Janeiro	1,91	2,35	2,10	3,44
Fevereiro	2,65	3,11	2,95	4,05
Março	3,77	4,41	4,22	5,20
Abril	4,64	5,40	5,13	5,72
Mai	5,10	6,19	5,75	6,14
Junho	5,91	7,30	6,70	7,02
Julho	6,08	7,46	6,93	7,27
Agosto	5,60	6,70	6,31	6,94
Setembro	4,29	5,05	4,82	5,75
Outubro	2,77	3,38	3,12	4,24
Novembro	1,93	2,40	2,15	3,33
Dezembro	1,52	1,96	1,71	2,91

Tabela 12 - Comparação dos valores de irradiação para diferentes inclinações na cidade de Évora - Parte 2.

Évora	I_{β}	I_{β} ASDC	I_{β}	I_{β} ASDC
	kWh/(m ² .dia)	kWh/(m ² .dia)	kWh/(m ² .dia)	kWh/(m ² .dia)
	38°		53°	
Janeiro	2,09	3,92	1,97	4,17
Fevereiro	2,96	4,40	2,82	4,50
Março	4,23	5,36	4,03	5,25
Abril	5,12	5,56	4,85	5,12
Maió	5,78	5,72	5,50	5,02
Junho	6,72	6,39	6,35	5,43
Julho	6,97	6,66	6,61	5,71
Agosto	6,34	6,62	6,02	5,95
Setembro	4,85	5,82	4,63	5,58
Outubro	3,15	4,52	3,01	4,56
Novembro	2,15	3,73	2,04	3,91
Dezembro	1,73	3,33	1,66	3,57

Analisando os valores obtidos, a maior diferença entre os resultados é de 54%. Este valor é referente ao mês de dezembro para uma inclinação de 53°.

Para a cidade de Faro os valores referenciados pelo ASDC foram para inclinações de 0°, 22°, 37° e 52°. As tabelas 13 e 14 apresentam os valores calculados e os disponibilizados pela NASA.

Tabela 13 - Comparação dos valores de irradiação para diferentes inclinações na cidade de Faro - Parte 1.

Faro	I_{β}	I_{β} ASDC	I_{β}	I_{β} ASDC
	kWh/(m ² .dia)	kWh/(m ² .dia)	kWh/(m ² .dia)	kWh/(m ² .dia)
	0°		22°	
Janeiro	2,05	2,47	2,26	3,51
Fevereiro	2,88	3,30	3,20	4,23
Março	4,00	4,61	4,42	5,37
Abril	4,87	5,66	5,38	5,96
Mai	5,31	6,41	5,97	6,33
Junho	6,12	7,50	6,90	7,20
Julho	6,33	7,64	7,15	7,42
Agosto	5,49	6,86	6,41	7,06
Setembro	4,56	5,27	5,09	5,95
Outubro	3,04	3,58	3,38	4,43
Novembro	2,15	2,58	2,37	3,52
Dezembro	1,69	2,07	1,88	2,98

Tabela 14 - Comparação dos valores de irradiação para diferentes inclinações na cidade de Faro - Parte 2.

Faro	I_{β}	I_{β} ASDC	I_{β}	I_{β} ASDC
	kWh/(m ² .dia)	kWh/(m ² .dia)	kWh/(m ² .dia)	kWh/(m ² .dia)
	37°		52°	
Janeiro	2,27	3,99	2,16	4,24
Fevereiro	3,21	4,59	3,06	4,70
Março	4,42	5,54	4,20	5,42
Abril	5,38	5,79	5,11	5,32
Mai	6,02	5,89	5,73	5,16
Junho	6,93	6,52	6,56	5,52
Julho	7,19	6,78	6,81	5,80
Agosto	6,59	6,72	6,40	6,03
Setembro	5,13	6,02	4,89	5,76
Outubro	3,39	4,72	3,24	4,76
Novembro	2,37	3,93	2,25	4,13
Dezembro	1,89	3,41	1,81	3,64

Analisando os valores obtidos, a maior diferença entre os resultados é de 50%. Este valor é referente ao mês de dezembro para uma inclinação de 50°.

Para a cidade de Lisboa os valores referenciados pelo ASDC foram para inclinações de 0°, 23°, 38° e 53°. As tabelas 15 e 16 apresentam os valores calculados e os disponibilizados pela NASA.

Tabela 15 - Comparação dos valores de irradiação para diferentes inclinações na cidade de Lisboa - Parte 1.

Lisboa	I_{β}	I_{β} ASDC	I_{β}	I_{β} ASDC
	kWh/(m ² .dia)	kWh/(m ² .dia)	kWh/(m ² .dia)	kWh/(m ² .dia)
	0°		23°	
Janeiro	1,96	2,38	2,12	3,50
Fevereiro	2,72	3,22	3,05	4,23
Março	3,94	4,67	4,43	5,56
Abril	5,10	5,97	5,69	6,37
Mai	5,47	6,78	6,25	6,73
Junho	5,83	7,20	6,59	6,93
Julho	5,91	7,20	6,73	7,03
Agosto	5,58	6,68	6,30	6,92
Setembro	4,48	5,31	5,06	6,09
Outubro	3,02	3,78	3,45	4,86
Novembro	2,02	2,56	2,26	3,63
Dezembro	1,53	2,00	1,73	3,00

Tabela 16 - Comparação dos valores de irradiação para diferentes inclinações na cidade de Lisboa - Parte 2.

Lisboa	I_{β}	I_{β} ASDC	I_{β}	I_{β} ASDC
	kWh/(m ² .dia)	kWh/(m ² .dia)	kWh/(m ² .dia)	kWh/(m ² .dia)
	38°		53°	
Janeiro	2,08	4,00	1,94	4,27
Fevereiro	3,07	4,61	2,92	4,73
Março	4,46	5,76	4,25	5,65
Abril	5,70	6,21	5,41	5,72
Mai	6,31	6,26	6,02	5,47
Junho	6,61	6,31	6,25	5,38
Julho	6,76	6,45	6,40	5,55
Agosto	6,33	6,61	6,02	5,95
Setembro	5,10	6,18	4,87	5,94
Outubro	3,51	5,24	3,39	5,32
Novembro	2,27	4,09	2,16	4,31
Dezembro	1,75	3,45	1,68	3,70

Analisando os valores obtidos, a maior diferença entre os resultados é de 55%. Este valor é referente aos meses de janeiro e dezembro para uma inclinação de 53°.

Para a cidade do Porto os valores referenciados pelo ASDC foram para inclinações de 0°, 23°, 38° e 53°. As tabelas 17 e 18 apresentam os valores calculados e os disponibilizados pela NASA.

Tabela 17 - Comparação dos valores de irradiação para diferentes inclinações na cidade de Porto - Parte 1.

Porto	I_{β}	I_{β} ASDC	I_{β}	I_{β} ASDC
	kWh/(m ² .dia)	kWh/(m ² .dia)	kWh/(m ² .dia)	kWh/(m ² .dia)
	0°		26°	
Janeiro	1,44	1,87	1,64	2,85
Fevereiro	2,17	2,69	2,54	3,63
Março	3,36	4,04	3,81	4,87
Abril	4,45	5,36	5,08	5,76
Mai	5,16	6,32	5,85	6,28
Junho	5,39	7,12	6,40	6,77
Julho	5,93	6,96	6,61	6,80
Agosto	5,08	6,18	5,82	6,45
Setembro	3,94	4,67	4,50	5,43
Outubro	2,55	3,07	2,89	4,00
Novembro	1,63	2,01	1,83	2,93
Dezembro	1,22	1,55	1,37	2,42

Tabela 18 - Comparação dos valores de irradiação para diferentes inclinações na cidade de Porto - Parte 2.

Porto	I_{β}	I_{β} ASDC	I_{β}	I_{β} ASDC
	kWh/(m ² .dia)	kWh/(m ² .dia)	kWh/(m ² .dia)	kWh/(m ² .dia)
	41°		56°	
Janeiro	1,65	3,21	1,57	3,39
Fevereiro	2,58	3,92	2,49	3,99
Março	3,81	5,01	3,61	4,88
Abril	5,09	5,59	4,83	5,14
Mai	5,82	5,83	5,48	5,10
Junho	6,47	6,14	6,16	5,22
Julho	6,51	6,23	6,05	5,35
Agosto	5,83	6,14	5,52	5,51
Setembro	4,51	5,48	4,28	5,24
Outubro	2,88	4,26	2,73	4,28
Novembro	1,82	3,25	1,72	3,39
Dezembro	1,36	2,76	1,29	2,93

Analisando os valores obtidos, a maior diferença entre os resultados é de 56%. Este valor é referente ao mês de dezembro para uma inclinação de 56°.

Para a cidade de Viana do Castelo os valores referenciados pelo ASDC foram para inclinações de 0°, 26°, 41° e 56°. As tabelas 19 e 20 apresentam os valores calculados e os disponibilizados pela NASA.

Tabela 19 - Comparação dos valores de irradiação para diferentes inclinações na cidade de Viana do Castelo - Parte 1.

Viana do Castelo	I_{β}	I_{β} ASDC	I_{β}	I_{β} ASDC
	kWh/(m ² .dia)	kWh/(m ² .dia)	kWh/(m ² .dia)	kWh/(m ² .dia)
	0°		26°	
Janeiro	1,39	1,87	1,60	2,88
Fevereiro	2,20	2,69	2,52	3,66
Março	3,31	4,04	3,77	4,89
Abril	4,42	5,36	5,05	5,78
Mai	5,11	6,31	5,83	6,30
Junho	5,16	7,12	6,32	6,78
Julho	5,16	6,96	6,34	6,82
Agosto	5,04	6,18	5,79	6,47
Setembro	3,90	4,67	4,46	5,45
Outubro	2,51	3,07	2,84	4,03
Novembro	1,62	2,01	1,80	2,95
Dezembro	1,18	1,56	1,33	2,45

Tabela 20 -Comparação dos valores de irradiação para diferentes inclinações na cidade de Viana do Castelo - Parte 2.

Viana do Castelo	I_{β}	I_{β} ASDC	I_{β}	I_{β} ASDC
	kWh/(m ² .dia)	kWh/(m ² .dia)	kWh/(m ² .dia)	kWh/(m ² .dia)
	41°		56°	
Janeiro	1,61	3,26	1,54	3,45
Fevereiro	2,54	3,96	2,43	4,04
Março	3,77	5,04	3,58	4,93
Abril	5,06	5,62	4,81	5,17
Mai	5,81	5,86	5,49	5,13
Junho	6,46	6,17	6,22	5,26
Julho	6,50	6,26	6,27	5,38
Agosto	5,81	6,17	5,51	5,55
Setembro	4,47	5,51	4,26	5,28
Outubro	2,84	4,29	2,70	4,33
Novembro	1,78	3,29	1,67	3,44
Dezembro	1,32	2,80	1,25	2,99

Analisando os valores obtidos, a maior diferença entre os resultados é de 58%. Este valor é referente ao mês de dezembro para uma inclinação de 56°.

Os resultados obtidos em todas as cidade em estudo tiveram em alguns meses e para as diferentes inclinações, valores com uma diferença percentual significativa.

3.5 Comparação da irradiação em função do ângulo de inclinação

A inclinação dada a um painel solar térmico influencia o desempenho do mesmo, pelo que interessa saber qual a melhor inclinação que o painel deve ter. Assim a potência captada será a melhor com o ângulo de inclinação ótimo.

Considerando a orientação do painel a Sul no hemisfério Norte, o valor da irradiação em função do ângulo de inclinação é apresentado nas tabelas seguintes. Fizeram-se simulações com ângulos de inclinação entre os 0° e os 60°. Para cada cidade em estudo será apresentado o maior valor de irradiação obtido para as estações de Verão (Abril a Setembro ($\sum I_{\beta} \times n^{\circ}$ de dias dos seis meses)) e Inverno (Janeiro a Março e de Outubro a Dezembro ($\sum I_{\beta} \times n^{\circ}$ de dias dos seis meses)) e o valor médio anual ($\sum I_{\beta} \times n^{\circ}$ de dias do mês).

Começando pela cidade de Bragança os valores obtidos estão apresentados na tabela 21.

Tabela 21 - Irradiação incidente numa superfície pousada na cidade de Bragança em função da inclinação.

Bragança	I_{β} (kWh/(m ² .dia))						
	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°
Janeiro	1,35	1,45	1,52	1,56	1,57	1,53	1,47
Fevereiro	2,19	2,36	2,47	2,53	2,53	2,48	2,37
Março	3,30	3,54	3,70	3,78	3,77	3,67	3,50
Abril	4,07	4,35	4,53	4,62	4,59	4,47	4,25
Mai	4,88	5,23	5,45	5,55	5,51	5,34	5,05
Junho	4,95	5,62	6,11	6,43	6,56	6,52	6,29
Julho	5,45	6,06	6,50	6,75	6,82	6,71	6,42
Agosto	5,25	5,68	5,97	6,11	6,11	5,96	5,66
Setembro	3,95	4,25	4,45	4,56	4,55	4,45	4,24
Outubro	2,36	2,52	2,63	2,68	2,66	2,59	2,46
Novembro	1,59	1,67	1,72	1,73	1,70	1,63	1,53
Dezembro	1,15	1,23	1,27	1,30	1,29	1,25	1,19
	I_{β} (kWh/m ²)						
Anual	1236,22	1341,84	1414,44	1452,39	1455,12	1422,72	1356,11
Inverno	364,23	389,50	406,21	413,86	412,22	401,32	381,51
Verão	871,99	952,34	1008,23	1038,53	1042,90	1021,40	974,60

Pela análise da tabela, o total da irradiação que chega a uma superfície pousada na cidade de Bragança obtém o seu valor máximo anual para um ângulo de inclinação face à horizontal de 40°, o mesmo acontece para a estação de Verão. Na estação de Inverno o ângulo de inclinação com maior valor de irradiação é de 30°.

Para a cidade de Castelo Branco os valores obtidos estão apresentados na tabela 22.

Tabela 22 - Irradiação incidente numa superfície pousada na cidade de Castelo Branco em função da inclinação.

Castelo Branco	I_{β} (kWh/(m ² .dia))						
	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°
Janeiro	1,67	1,79	1,87	1,91	1,90	1,86	1,77
Fevereiro	2,45	2,62	2,72	2,76	2,74	2,66	2,52
Março	3,54	3,78	3,94	4,00	3,98	3,86	3,66
Abril	4,23	4,58	4,82	4,95	4,96	4,86	4,65
Mai	4,34	4,87	5,27	5,53	5,64	5,61	5,43
Junho	6,17	6,55	6,77	6,82	6,69	6,41	5,96
Julho	6,11	6,62	6,95	7,09	7,06	6,84	6,44
Agosto	5,48	5,90	6,18	6,31	6,28	6,10	5,77
Setembro	4,18	4,49	4,69	4,78	4,76	4,63	4,40
Outubro	2,69	2,86	2,97	3,01	2,98	2,89	2,73
Novembro	1,76	1,87	1,95	1,98	1,96	1,90	1,80
Dezembro	1,41	1,50	1,55	1,57	1,56	1,51	1,42
I_{β} (kWh/m ²)							
Anual	1343,69	1447,60	1516,41	1547,96	1541,96	1499,91	1421,20
Inverno	412,46	439,91	457,61	464,63	461,28	447,86	424,06
Verão	931,23	1007,69	1058,80	1083,33	1080,68	1052,05	997,14

Ao contrário da cidade de Bragança, a cidade de Castelo Branco apresenta o maior valor de irradiação anual para uma inclinação de 30°, o mesmo acontece para a estação de Verão e Inverno. Embora as duas estações tenham como ângulo ideal de inclinação 30°, o valor obtido de irradiação recebida é substancialmente superior na estação de Verão.

Para a cidade de Évora os valores obtidos estão apresentados na tabela 23.

Tabela 23 - Irradiação incidente numa superfície pousada na cidade de Évora em função da inclinação.

Évora	I_{β} (kWh/(m ² .dia))						
	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°
Janeiro	1,91	2,03	2,09	2,11	2,08	2,01	1,88
Fevereiro	2,65	2,82	2,93	2,98	2,95	2,86	2,71
Março	3,77	4,03	4,19	4,25	4,22	4,08	3,86
Abril	4,64	4,93	5,10	5,16	5,10	4,93	4,64
Mai	5,10	5,47	5,71	5,81	5,76	5,58	5,26
Junho	5,91	6,36	6,65	6,75	6,69	6,45	6,05
Julho	6,08	6,57	6,87	7,00	6,95	6,71	6,31
Agosto	5,60	6,00	6,26	6,37	6,32	6,11	5,76
Setembro	4,29	4,59	4,79	4,87	4,84	4,70	4,44
Outubro	2,77	2,96	3,09	3,15	3,14	3,05	2,90
Novembro	1,93	2,05	2,13	2,16	2,14	2,07	1,96
Dezembro	1,52	1,63	1,70	1,73	1,72	1,68	1,59
I_{β} (kWh/m ²)							
Anual	1409,20	1509,07	1572,28	1597,64	1584,54	1533,26	1445,65
Inverno	443,82	473,43	492,04	499,66	495,71	480,46	454,52
Verão	965,38	1035,64	1080,24	1097,98	1088,83	1052,80	991,13

No seguimento dos resultados obtidos para a cidade de Castelo Branco, para a cidade de Évora o ângulo com o maior valor de irradiação anual é igualmente de 30°, o mesmo é obtido para as duas estações do ano, Verão e Inverno.

Para a cidade de Faro os valores obtidos estão apresentados na tabela 24.

Tabela 24 - Irradiação incidente numa superfície pousada na cidade de Faro em função da inclinação.

Faro	I_{β} (kWh/(m ² .dia))						
	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°
Janeiro	2,05	2,17	2,25	2,28	2,26	2,18	2,05
Fevereiro	2,88	3,07	3,19	3,23	3,20	3,09	2,91
Março	4,00	4,24	4,40	4,45	4,39	4,24	3,99
Abril	4,87	5,17	5,36	5,42	5,35	5,16	4,85
Mai	5,31	5,69	5,94	6,04	5,99	5,79	5,45
Junho	6,12	6,59	6,87	6,97	6,89	6,63	6,20
Julho	6,33	6,82	7,12	7,23	7,15	6,89	6,44
Agosto	5,49	6,00	6,36	6,56	6,59	6,45	6,15
Setembro	4,56	4,87	5,07	5,14	5,10	4,94	4,66
Outubro	3,04	3,24	3,36	3,41	3,38	3,27	3,08
Novembro	2,15	2,28	2,36	2,38	2,35	2,27	2,14
Dezembro	1,69	1,80	1,87	1,90	1,88	1,82	1,72
I_{β} (kWh/m ²)							
Anual	1479,73	1585,09	1652,61	1678,94	1664,34	1609,45	1515,17
Inverno	482,20	512,38	531,59	538,31	532,51	514,52	484,63
Verão	997,53	1072,71	1121,02	1140,63	1131,83	1094,93	1030,54

Para a cidade de Faro o ângulo com o maior valor de irradiação anual é também de 30°, o mesmo é obtido para as duas estações do ano, Verão e Inverno.

Para a cidade de Lisboa os valores obtidos estão apresentados na tabela 25.

Tabela 25 - Irradiação incidente numa superfície pousada na cidade de Lisboa em função da inclinação.

Lisboa	I_{β} (kWh/(m ² .dia))						
	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°
Janeiro	1,96	2,00	2,11	2,11	2,07	1,98	1,84
Fevereiro	2,72	2,91	3,03	3,08	3,06	2,96	2,80
Março	3,94	4,17	4,39	4,47	4,44	4,31	4,08
Abril	5,10	4,88	5,65	5,73	5,68	5,49	5,17
Mai	5,47	5,89	6,19	6,32	6,29	6,10	5,76
Junho	5,83	6,30	6,54	6,65	6,58	6,35	5,95
Julho	5,91	6,39	6,67	6,79	6,73	6,51	6,11
Agosto	5,58	5,99	6,25	6,36	6,31	6,11	5,76
Setembro	4,48	4,81	5,01	5,11	5,09	4,94	4,68
Outubro	3,02	3,31	3,42	3,51	3,51	3,43	3,27
Novembro	2,02	2,16	2,24	2,28	2,26	2,19	2,07
Dezembro	1,53	1,65	1,71	1,75	1,75	1,70	1,62
I_{β} (kWh/m ²)							
Anual	1451,49	1540,29	1624,01	1653,03	1641,14	1589,28	1498,94
Inverno	463,43	494,22	515,6	524,76	521,41	505,56	478,41
Verão	988,06	1046,07	1108,41	1128,27	1119,73	1083,72	1020,53

Para a cidade de Lisboa o ângulo com o maior valor de irradiação anual é também de 30°, o mesmo é obtido para as duas estações do ano, Verão e Inverno.

Para a cidade do Porto os valores obtidos estão apresentados na tabela 26.

Tabela 26 - Irradiação incidente numa superfície pousada na cidade do Porto em função da inclinação.

Porto	I_{β} (kWh/(m ² .dia))						
	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°
Janeiro	1,44	1,55	1,62	1,65	1,65	1,61	1,53
Fevereiro	2,17	2,35	2,48	2,56	2,58	2,54	2,45
Março	3,36	3,60	3,76	3,83	3,81	3,71	3,53
Abril	4,45	4,78	5,00	5,11	5,09	4,96	4,72
Mai	5,16	5,53	5,77	5,87	5,83	5,65	5,34
Junho	5,39	5,91	6,27	6,46	6,48	6,33	6,01
Julho	5,93	6,32	6,55	6,62	6,53	6,27	5,87
Agosto	5,08	5,47	5,73	5,85	5,84	5,68	5,39
Setembro	3,94	4,23	4,43	4,52	4,51	4,40	4,19
Outubro	2,55	2,73	2,85	2,90	2,89	2,81	2,67
Novembro	1,63	1,73	1,80	1,83	1,82	1,77	1,67
Dezembro	1,22	1,30	1,35	1,37	1,36	1,32	1,26
I_{β} (kWh/m ²)							
Anual	1292,17	1389,15	1453,45	1482,63	1477,03	1436,01	1362,04
Inverno	377,5	404,63	422,9	431,39	430,43	419,71	399,84
Verão	914,67	984,52	1030,55	1051,24	1046,6	1016,3	962,2

Para a cidade do Porto o ângulo com o maior valor de irradiação anual é também de 30°, o mesmo é obtido para as duas estações do ano, Verão e Inverno.

Para a cidade de Viana do Castelo os valores obtidos estão apresentados na tabela 27.

Tabela 27 - Irradiação incidente numa superfície pousada na cidade de Viana do Castelo em função da inclinação.

Viana do Castelo	I_{β} (kWh/(m ² .dia))						
	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°
Janeiro	1,39	1,50	1,57	1,61	1,61	1,58	1,51
Fevereiro	2,20	2,36	2,48	2,54	2,54	2,49	2,38
Março	3,31	3,55	3,71	3,79	3,78	3,68	3,50
Abril	4,42	4,75	4,97	5,08	5,07	4,94	4,71
Mai	5,11	5,50	5,75	5,86	5,82	5,65	5,35
Junho	5,16	5,74	6,15	6,39	6,47	6,36	6,09
Julho	5,16	5,75	6,17	6,42	6,50	6,41	6,14
Agosto	5,04	5,44	5,70	5,83	5,82	5,67	5,38
Setembro	3,90	4,19	4,39	4,48	4,48	4,37	4,16
Outubro	2,51	2,68	2,80	2,86	2,85	2,77	2,64
Novembro	1,62	1,72	1,78	1,80	1,78	1,72	1,62
Dezembro	1,18	1,26	1,31	1,33	1,33	1,29	1,23
I_{β} (kWh/m ²)							
Anual	1251,5	1356,52	1427,93	1464,86	1466,67	1432,46	1364,67
Inverno	372,49	398,73	416,41	424,95	423,73	412,73	392,9
Verão	879,01	957,79	1011,52	1039,91	1042,94	1019,73	971,77

Para a cidade de Viana do Castelo o ângulo com o maior valor de irradiação anual é de 40°, o mesmo acontece para a estação de Verão. Na estação de Inverno o ângulo de inclinação com maior valor de irradiação é de 30°.

De uma forma geral o ângulo de inclinação ideal é de 30°, para as cidades mais a norte esse valor é de 40°, que é o caso de Bragança e Viana do Castelo. As variações dos níveis de irradiação mensal é notória entre os diferentes meses do anos, tendo valores superiores nos meses de Verão. Todas as cidades apresentam um forte potencial de irradiação, Faro é a cidade com o valor anual mais elevado.

3.6 Cálculo da potência térmica associada ao gerador

Para o presente estudo é necessário a realização de uma análise termodinâmica para os diferentes pontos de funcionamento do sistema. Através do balanço energético ao gerador, obteve-se a potência térmica associada ao gerador.

Inicialmente foram determinadas as propriedades termodinâmicas, entalpia (h), concentração da mistura LiBr/H₂O (x) e temperaturas dos pontos assinalados no ciclo representado na figura 18. Para um melhor estudo comparativo, foram atribuídas diferentes temperaturas de trabalho aos componentes do ciclo.

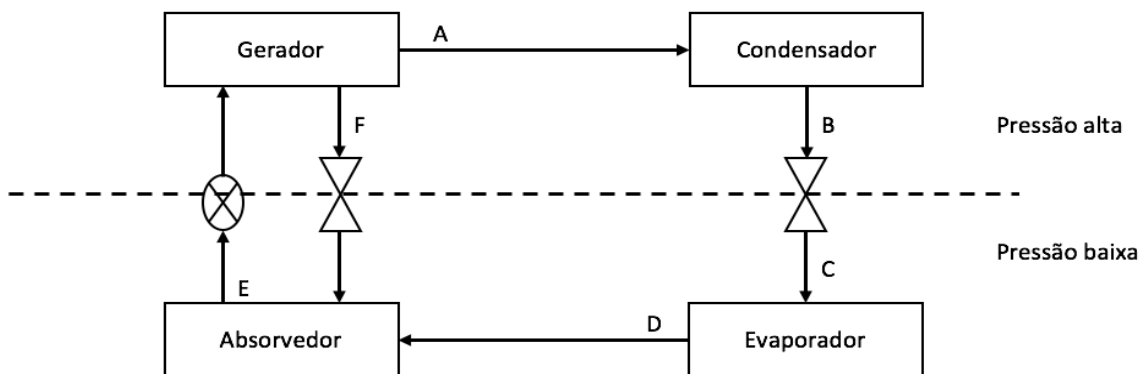


Figura 18 - Esquema de um sistema de refrigeração solar com a marcação dos pontos do ciclo. Fonte: autoria própria.

O ciclo tem duas pressões de funcionamento, pressão baixa que corresponde à pressão de evaporação e está relacionada com a temperatura do evaporador ($P_C=P_D=P_E$) e pressão alta correspondente à pressão de condensação e está associada à temperatura no condensador ($P_B=P_A=P_F$).

As concentrações de funcionamento são obtidas a partir das propriedades da mistura do ciclo, neste caso LiBr/H₂O, utilizando o gráfico de equilíbrio para soluções aquosas de brometo de lítio e está apresentado na figura 3 do ponto 2.1.2. No ponto E temos a solução fraca e no ponto F a solução forte, os restantes pontos correspondem a vapor de água e encontram-se fora do gráfico. A entalpia por sua vez pode ser obtida a partir do diagrama entalpia-concentração para soluções LiBr/H₂O representado na figura 4 do ponto 2.1.2. Estes mesmos gráficos são apresentados nas figuras 19 e 20 a título de exemplo para a determinação das propriedades do ponto E e F.

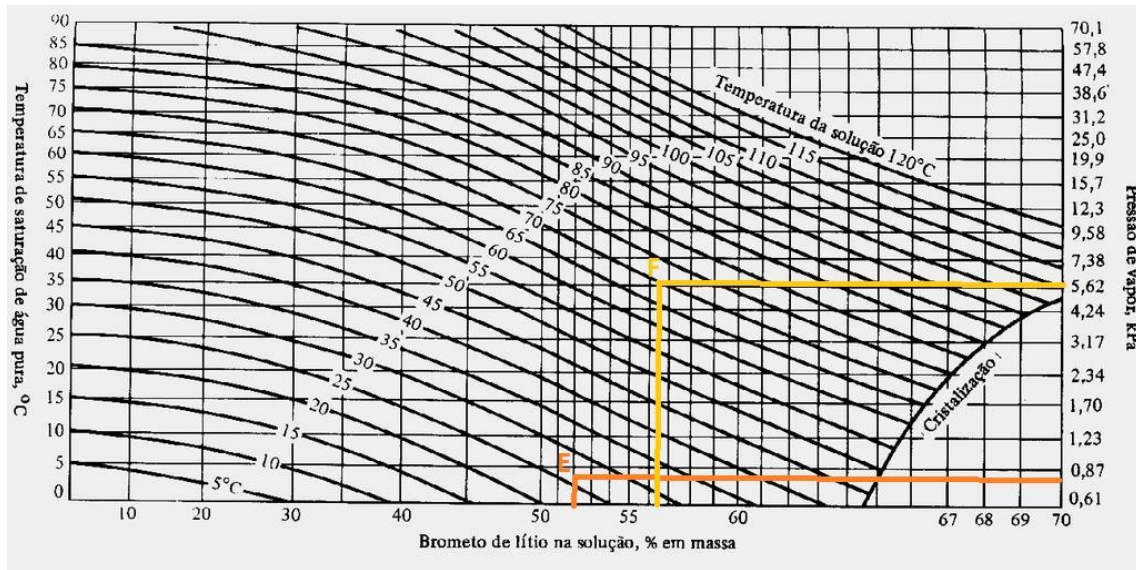


Figura 19 - Obtenção das propriedades da solução aquosa de LiBr.

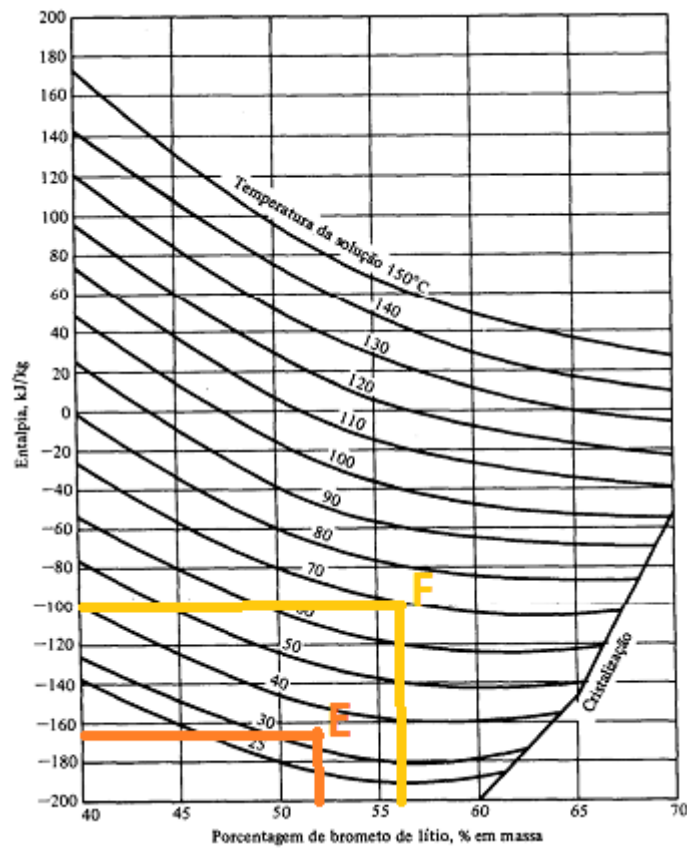


Figura 20 - Obtenção das propriedades da solução aquosa de LiBr.

Obtidos os valores das propriedades termodinâmicas nos pontos E e F do ciclo, foi feito o cálculo do balanço mássico e energético no evaporador e no gerador para as

diferentes temperaturas em estudo. Para o estudo do desempenho do sistema e posterior aplicação do método da fração solar foram feitos quatro casos de estudo, apresentados e analisados nos tópicos seguintes. Através dos casos de estudos apresentados e dos seus estados termodinâmicos definidos, foram escritas as equações dos balanços de massa e de energia para cada componente.

Os caudais mássicos nos pontos A, B, C e D não iguais e o seu valor é calculado segundo a expressão 3.1. Já os caudais mássicos dos pontos E e F são obtidos através dos balanços mássicos global, expressão 3.2 e para o LiBr, expressão 3.3.

$$\dot{m}_A = \dot{m}_B = \dot{m}_C = \dot{m}_D = \frac{\dot{Q}_E}{(h_D - h_C)} \quad (3.1)$$

$$\dot{m}_A + \dot{m}_F = \dot{m}_E \quad (3.2)$$

$$\dot{m}_A x_A + \dot{m}_F x_F = \dot{m}_E x_E \quad (3.3)$$

Em que,

$$x_A = 0;$$

\dot{Q}_E – Potência atribuída ao evaporador.

A potência associada ao gerador foi determinada segundo o balanço energético expresso na equação 3.4.

$$\dot{Q}_G = \dot{m}_F h_F + \dot{m}_A h_A - \dot{m}_E h_E \quad (3.4)$$

Em que,

\dot{Q}_G – Potência do gerador.

O coeficiente de desempenho do ciclo foi obtido através da equação 2.1, já descrita no subcapítulo 2.1.1.

3.6.1 Caso de estudo 1

De modo a perceber o impacto que a variação da temperatura no gerador tem sobre o desempenho do sistema (COP), foram feitos os cálculos para os seguintes valores apresentadas na tabela 28.

Tabela 28 - Parâmetros considerados para o cálculo do COP.

Temperatura Absorvedor (°C)	30
Temperatura Evaporador (°C)	4
Temperatura Condensador (°C)	35
Temperatura Gerador (°C)	70; 75; 80; 85; 90 e 95
Potência Evaporador (W)	1000

Para cada valor de temperatura atribuída ao gerador e para a temperatura atribuída ao absorvedor, foram obtidos os valores das propriedades termodinâmicas do fluido de trabalho. Feito os balanços energéticos aos componentes do sistema de refrigeração, os valores obtidos do COP estão apresentados no gráfico da figura 21.

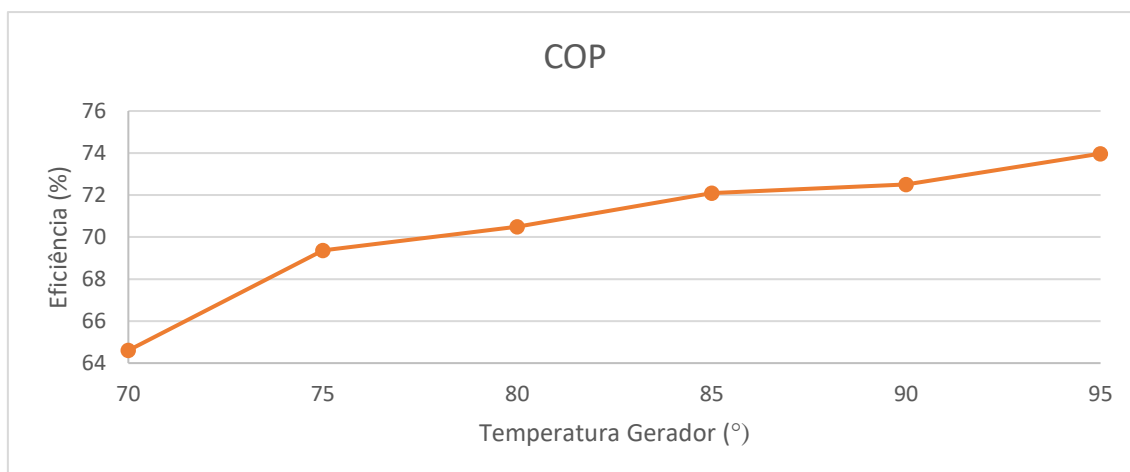


Figura 21 - Desempenho do sistema em função da temperatura do gerador.

Da análise do gráfico conclui-se que quanto maior for a temperatura no gerador, maior será o desempenho do sistema. O COP do sistema é obtido pela razão entre a potência do evaporador com a potência do gerador, com o aumento da temperatura no gerador a entalpia do sistema no ponto F diminui e a concentração da solução LiBr aumenta, influenciando assim o balanço mássico e energético que posteriormente resulta na potência do gerador.

3.6.2 Caso de estudo 2

Mantendo a variação da temperatura no gerador, nesta hipótese foi considerada também a variação da temperatura no absorvedor e aumento da temperatura de trabalho no evaporador, foram feitas as considerações seguintes apresentadas na tabela 29.

Tabela 29 - Parâmetros considerados para o cálculo do COP.

Temperatura Absorvedor (°C)	25; 32; 36
Temperatura Evaporador (°C)	6
Temperatura Condensador (°C)	35
Temperatura Gerador (°C)	70; 75; 80; 85; 90 e 95
Potência Evaporador (W)	1000

Para cada valor de temperatura atribuída ao gerador e absorvedor foram obtidos os valores das propriedades termodinâmicas do fluido de trabalho. Feito os balanços energéticos aos componentes do sistema de refrigeração, os valores obtidos do COP estão apresentados no gráfico da figura 22.

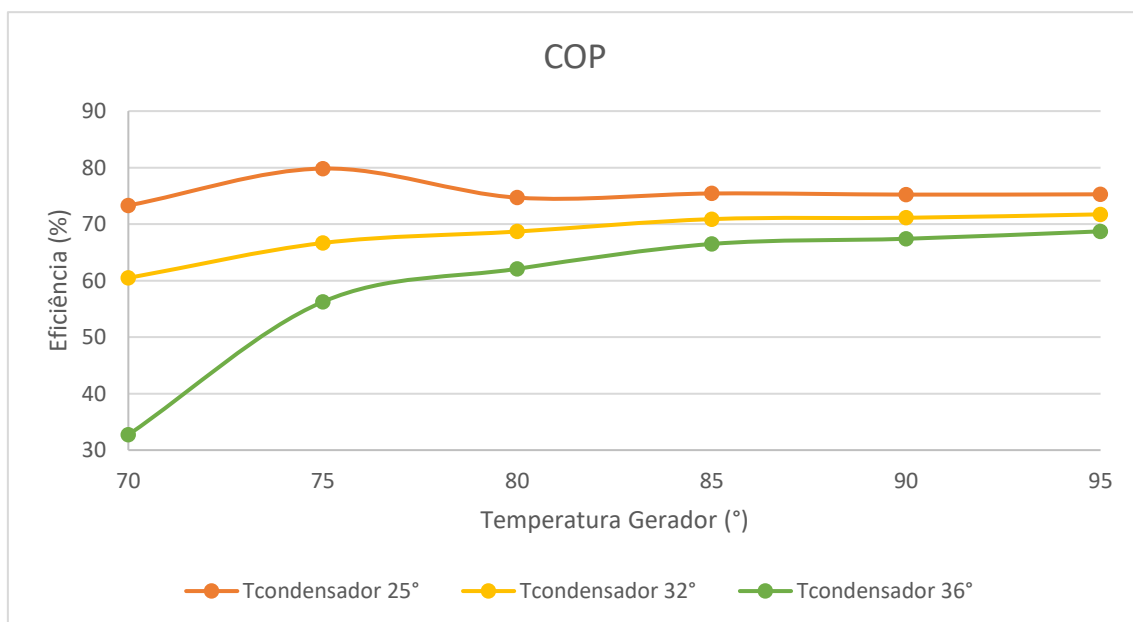


Figura 22 - Desempenho do sistema em função da temperatura do gerador e absorvedor.

Observando o gráfico, para temperaturas do absorvedor de 32°C e 36°C o COP aumenta com o aumento da temperatura do gerador, alcançando a partir dos 85°C um valor quase constante. Para uma temperatura do absorvedor de 25°C, o COP inicialmente aumenta mas após os 75°C diminui até alcançar um valor constante a partir dos 80°C. Fazendo varias as temperaturas do absorvedor, as propriedades termodinâmicas do sistema no ponto E variam igualmente. Isto faz com que os balanços mássicos e energéticos influenciem a potência obtida para o gerador.

Conclui-se assim que, para um funcionamento mais regular e eficiente do sistema, a temperatura do absorvedor deverá situar-se entre os 30°C e 40°C.

3.6.3 Caso de estudo 3

Mantendo a variação da temperatura no gerador, nesta hipótese foi considerada a variação da temperatura no condensador e aumento da temperatura de trabalho no evaporador. Foi diminuído o intervalo de temperaturas do gerador para uma melhor análise dos valores obtidos. A potência no evaporador aumentou para 10 000W, foram feitas as considerações seguintes apresentadas na tabela 30.

Tabela 30 - Parâmetros considerados para o cálculo do COP.

Temperatura Absorvedor (°C)	38
Temperatura Evaporador (°C)	8
Temperatura Condensador (°C)	30; 35; 40; 42 e 43
Temperatura Gerador (°C)	83; 85; 90; 95 e 100
Potência Evaporador (W)	10000

Para cada valor de temperatura atribuída ao gerador e para a temperatura atribuída ao absorvedor foram obtidos os valores das propriedades termodinâmicas do fluido de trabalho. Feito os balanços energéticos aos componentes do sistema de refrigeração, os valores obtidos do COP estão apresentados no gráfico da figura 23.

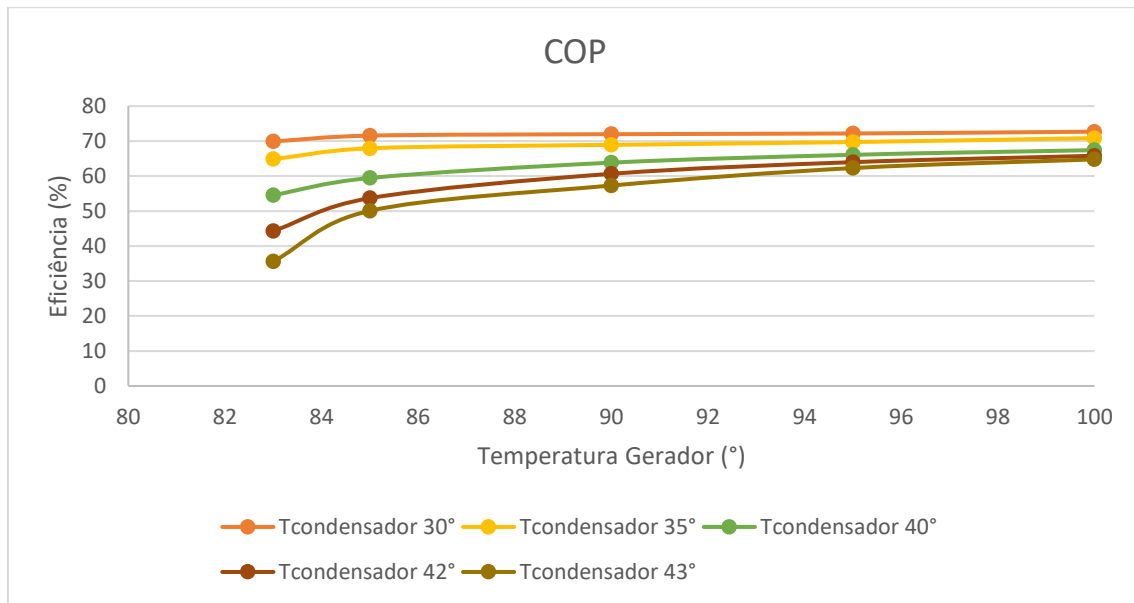


Figura 23 - Desempenho do sistema em função da temperatura do gerador e condensador.

De um modo geral, com o aumento da temperatura do gerador e diminuição da temperatura do condensador, o COP aumenta. Tendo para temperaturas de condensador menores, um valor de COP maior e constante com o aumento da temperatura do gerador. Mais uma vez, a variação da temperatura no gerador faz com que entalpia do sistema no ponto F diminua e a concentração da solução LiBr aumente, influenciando assim o balanço mássico e energético que posteriormente resulta na potência gerador.

3.6.4 Caso de estudo 4

Uma vez mais foi mantida a variação da temperatura no gerador, nesta hipótese foi considerada igualmente a variação da temperatura no condensador e mantidas todas as restantes face à hipótese anterior. A potência no evaporador aumentou para 100 000W, foram feitas as considerações seguintes apresentadas na tabela 31.

Tabela 31 - Parâmetros considerados para o cálculo do COP.

Temperatura Absorvedor (°C)	38
Temperatura Evaporador (°C)	8
Temperatura Condensador (°C)	30; 35; 40; 42 e 43
Temperatura Gerador (°C)	83; 85; 90; 95 e 100
Potência Evaporador (W)	1 000 000

Os valores das propriedades termodinâmicas do fluido de trabalho, foram os mesmo que obtidos na hipótese anterior. Feito os balanços energéticos aos componentes do sistema de refrigeração, os valores obtidos do COP estão apresentados no gráfico da figura 24.

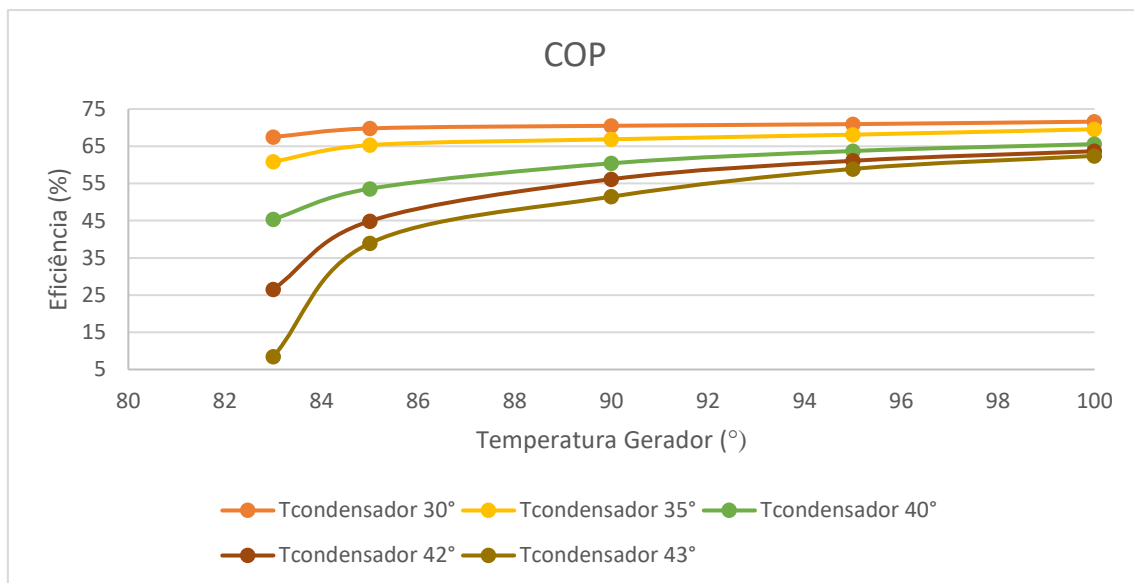


Figura 24 - Desempenho do sistema em função da temperatura do gerador e condensador.

O seguimento do que acontece na hipótese anterior, com o aumento da temperatura do gerador e diminuição da temperatura do condensador, o COP aumenta, alcançando valores quase constantes a partir dos 95°C.

Comparando com a hipótese anterior, nesta, com o aumento da potência atribuída ao evaporador o desempenho do sistema sofre uma queda muito acentuada,

principalmente quando a temperatura do condensador está nos 43°C e a do gerador está nos 83°C. O caudal mássico do sistema aumenta para os mesmos valores termodinâmicos do sistema no caso de estudo 3, com isto os balanços mássicos e energéticos ao sistema vão variar de forma a que a razão entre a potência do evaporador e a potência do gerador atinga valores de COP inferiores. Daqui pode-se concluir que este sistema não é eficiente para potências de trabalho tão altas.

Após análise dos dados obtidos conclui-se que o sistema é mais eficiente com as condições de trabalho expostas no caso de estudo 3. Posto isto, para os cálculos da potência associada ao gerador e posterior aplicação do método da fração solar os valores utilizados serão os obtidos através do caso de estudo 3.

3.7 Valores obtidos para a potência associada ao gerador

O cálculo da potência associada ao gerador no sistema de refrigeração por absorção é feito em função da temperatura de trabalho no gerador. Esta traduz-se no balanço energético feito ao gerador tendo em conta os resultados obtidos através do caso de estudo 3. Os valores estão expostos na tabela 32. Com base nestes valores foi feito o cálculo da potência associada ao gerador mensal para cada cidade em estudo.

Tabela 32 -Potência associada ao gerador em função da variação de temperatura dos componentes do sistema.

Temperatura Gerador (°C)	Potência (W) Tcond=30°C	Potência (W) Tcond=35°C	Potência (W) Tcond=40°C	Potência (W) Tcond=42°C	Potência (W) Tcond=43°C
83	1,36E+04	1,42E+04	1,54E+04	1,64E+04	1,72E+04
85	1,35E+04	1,39E+04	1,49E+04	1,56E+04	1,60E+04
90	1,35E+04	1,39E+04	1,45E+04	1,50E+04	1,54E+04
95	1,34E+04	1,38E+04	1,43E+04	1,47E+04	1,49E+04
100	1,34E+04	1,37E+04	1,42E+04	1,45E+04	1,46E+04

3.8 Aplicação do método da fração solar

Para a obtenção dos resultados da fração solar, percentagem de energia utilizada no aquecimento de água, para cada cidade em estudo e tendo em conta as potências associadas ao gerador mensais obtidas foi considerada uma variação no número de painéis utilizados. Esta variação permitiu perceber o número de painéis necessários para dar resposta ao sistema. Nos tópicos seguintes estão expostos os valores obtidos para cada cidade em função do número de painéis utilizados. Para este caso de estudo, os valores atribuídos ao número de painéis foi de 1, 10, 20, 30, 40 e 50.

Com base nos valores obtidos para o COP na 3ª hipótese, foi selecionada a temperatura no condensador de 30°C para a aplicação do método da fração solar. A temperatura do gerador selecionada foi de 90°C, tendo em conta que a potência associada ao gerador é praticamente constante com o aumento da temperatura do gerador e o valor do COP começa a ser praticamente constante após esta temperatura.

O cálculo dos parâmetros adimensionais X e Y foi feito através das correlações 2.9 e 2.10, descritas no ponto 2.4.1, já a fração solar (f) foi feito através da equação 2.11 descrita no mesmo ponto, em que, para os resultados obtidos com $f > 1$ adotou-se $f = 1$. Os valores apresentados têm todos como base uma folha de cálculo e estão presentes em anexo.

3.8.1 Resultados para a cidade de Bragança

Para a cidade de Bragança o cálculo foi feito segundo o melhor ângulo de inclinação, ou seja, o ângulo com mais irradiação incidente no painel solar térmico, essa inclinação foi de 40°.

Primeiramente será feita uma análise dos valores obtidos segundo a variação da temperatura do gerador e do número de painéis, figura 25. De seguida será apresentado os resultados dos parâmetros adimensionais (X e Y) e fração solar média mensal do sistema solar térmico correspondente ao valor máximo obtido em função do número de painéis, tabela 33.

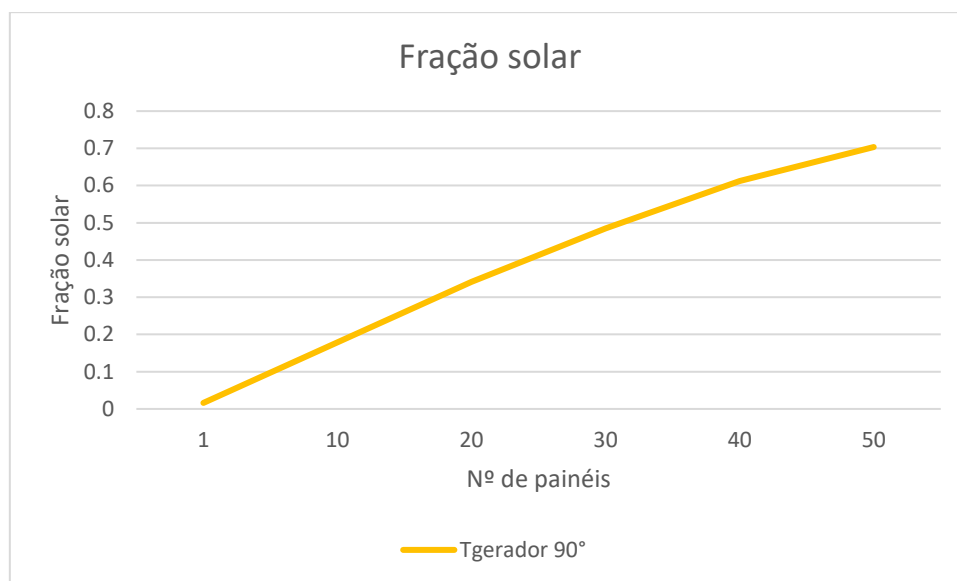


Figura 25 - Fração solar em função do número de painéis para Bragança.

O valor máximo anual da fração solar é para 50 painéis solares térmicos. A fração solar aumenta com o aumento do número painéis e consequente área de captação.

Tabela 33 - Fração solar obtida para a cidade de Bragança com 50 painéis solares térmicos para Bragança.

Meses	X	Y	f	Q _{solar} mensal	
	-	-	-	GJ	kWh
Janeiro	0,0461	0,3284	0,3093	12,05	3347,38
Fevereiro	0,0452	0,5467	0,4899	17,24	4789,05
Março	0,0440	0,8196	0,6878	26,80	7443,59
Abril	0,0433	1,0098	0,8086	30,49	8468,86
Mai	0,0417	1,2046	0,9189	35,80	9944,93
Junho	0,0396	1,4357	1,0000	37,70	10473,44
Julho	0,0379	1,4975	1,0000	38,96	10822,56
Agosto	0,0380	1,3467	0,9915	38,63	10730,24
Setembro	0,0395	0,9990	0,8023	30,25	8402,94
Outubro	0,0420	0,5785	0,5147	20,06	5570,88
Novembro	0,0442	0,3448	0,3237	12,21	3390,48
Dezembro	0,0455	0,2698	0,2572	10,02	2783,83

A fração solar anual para um conjunto de 50 painéis solares térmicos é de 0,68.

3.8.2 Resultados para a cidade de Castelo Branco

Para a cidade de Castelo Branco o cálculo foi feito segundo o melhor ângulo de inclinação, ou seja, o ângulo com mais irradiação incidente no painel solar térmico, essa inclinação foi de 30°.

Primeiramente será feita uma análise dos valores obtidos segundo a variação da temperatura do gerador e do número de painéis, figura 26. De seguida será apresentado os resultados dos parâmetros adimensionais (X e Y) e fração solar média mensal do sistema solar térmico correspondente ao valor máximo obtido em função do número de painéis, tabela 34.

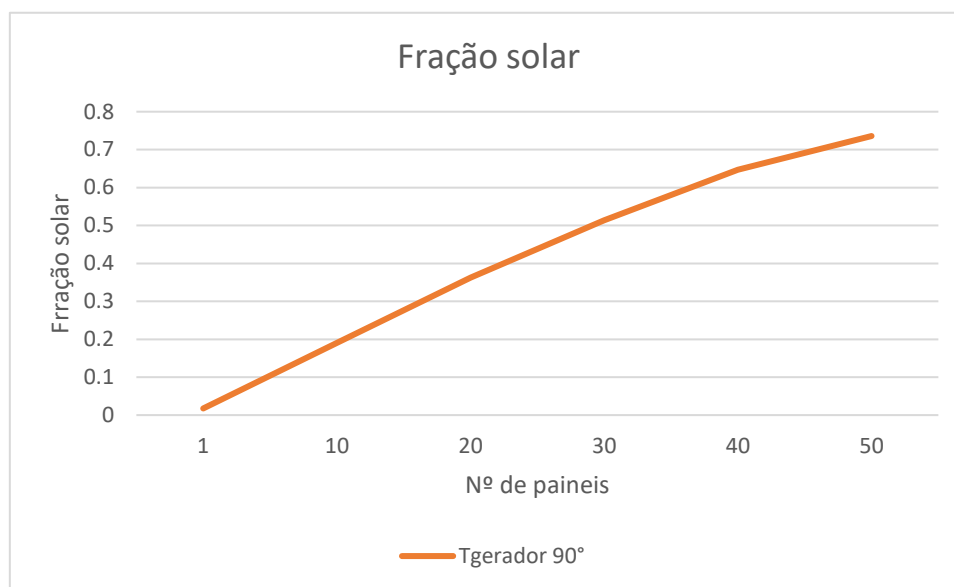


Figura 26 - Fração solar em função do número de painéis para Castelo Branco.

O valor máximo anual da fração solar é para 50 painéis solares térmicos. A fração solar aumenta com o aumento do número painéis e consequente área de captação.

Tabela 34 - Fração solar obtida para a cidade de Bragança com 50 painéis solares térmicos para Castelo Branco.

Meses	X	Y	f	Q _{solar} mensal	
	-	-	-	GJ	kWh
Janeiro	0,0479	0,4333	0,3985	14,38	3993,78
Fevereiro	0,0470	0,6453	0,5647	18,40	5111,65
Março	0,0454	0,9410	0,7663	27,65	7679,90
Abril	0,0452	1,1709	0,9006	31,44	8734,02
Mai	0,0432	1,3002	0,9682	34,93	9702,87
Junho	0,0411	1,6176	1,0000	34,91	9698,47
Julho	0,0390	1,6897	1,0000	36,08	10021,75
Agosto	0,0393	1,5075	1,0000	36,08	10021,75
Setembro	0,0411	1,1349	0,8810	30,76	8544,32
Outubro	0,0436	0,7065	0,6094	21,99	6107,39
Novembro	0,0459	0,4335	0,3988	13,92	3867,72
Dezembro	0,0473	0,3563	0,3334	12,03	3341,69

A fração solar anual para um conjunto de 50 painéis solares térmicos é de 0,74.

3.8.3 Resultados para a cidade de Évora

Para a cidade de Évora o cálculo foi feito segundo o melhor ângulo de inclinação, ou seja, o ângulo com mais irradiação incidente no painel solar térmico, essa inclinação foi de 30°.

Primeiramente será feita uma análise dos valores obtidos segundo a variação da temperatura do gerador e do número de painéis, figura 27. De seguida será apresentado os resultados dos parâmetros adimensionais (X e Y) e fração solar média mensal do sistema solar térmico correspondente ao valor máximo obtido em função do número de painéis, tabela 35.

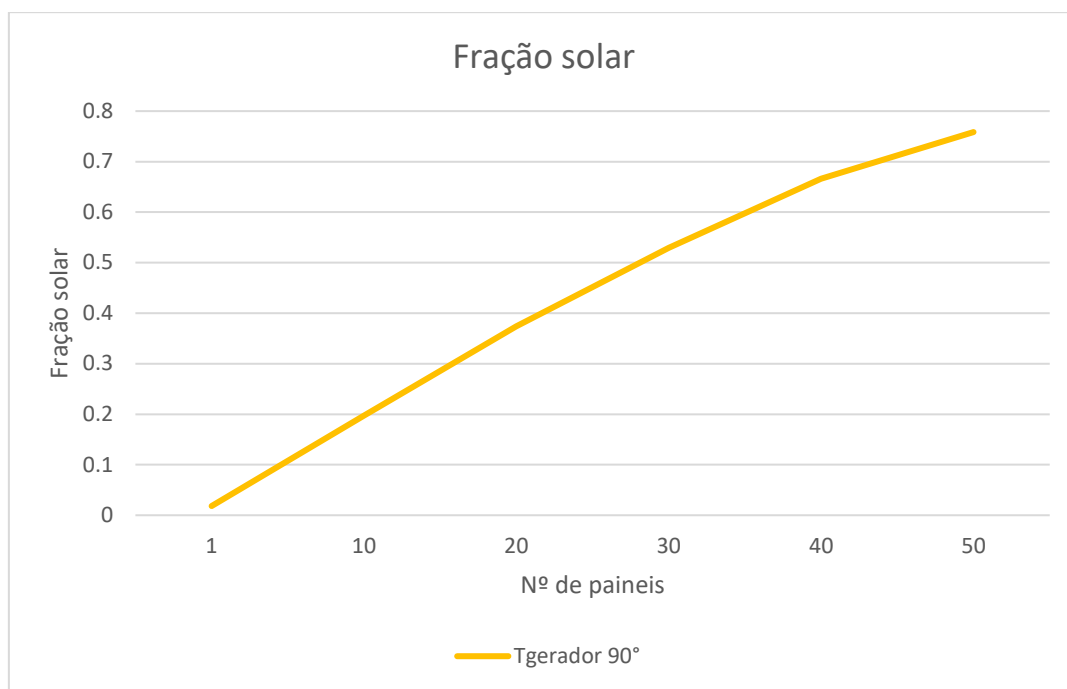


Figura 27 - Fração solar em função do número de painéis para Évora.

O valor máximo anual da fração solar é para 50 painéis solares térmicos. A fração solar aumenta com o aumento do número painéis e consequente área de captação.

Tabela 35 - Fração solar obtida para a cidade de Bragança com 50 painéis solares térmicos para Évora.

Meses	X	Y	f	Q _{solar} mensal	
	-	-	-	GJ	kWh
Janeiro	0,0472	0,4806	0,4372	15,78	4381,98
Fevereiro	0,0466	0,6965	0,6021	19,62	5449,82
Março	0,0456	1,0010	0,8031	28,98	8048,83
Abril	0,0450	1,2249	0,9294	32,45	9013,73
Mai	0,0436	1,3707	1,0000	36,08	10021,75
Junho	0,0415	1,6025	1,0000	34,91	9698,47
Julho	0,0399	1,6671	1,0000	36,08	10021,75
Agosto	0,0399	1,5223	1,0000	36,08	10021,75
Setembro	0,0409	1,1557	0,8925	31,16	8656,06
Outubro	0,0432	0,7396	0,6329	22,84	6343,10
Novembro	0,0453	0,4746	0,4326	15,10	4195,19
Dezembro	0,0466	0,3924	0,3643	13,14	3651,19

A fração solar anual para um conjunto de 50 painéis solares térmicos é de 0,76.

3.8.4 Resultados para a cidade de Faro

Para a cidade de Faro o cálculo foi feito segundo o melhor ângulo de inclinação, ou seja, o ângulo com mais irradiação incidente no painel solar térmico, essa inclinação foi de 30°.

Primeiramente será feita uma análise dos valores obtidos segundo a variação da temperatura do gerador e do número de painéis, figura 28. De seguida será apresentado os resultados dos parâmetros adimensionais (X e Y) e fração solar média mensal do sistema solar térmico correspondente ao valor máximo obtido em função do número de painéis, tabela 36.

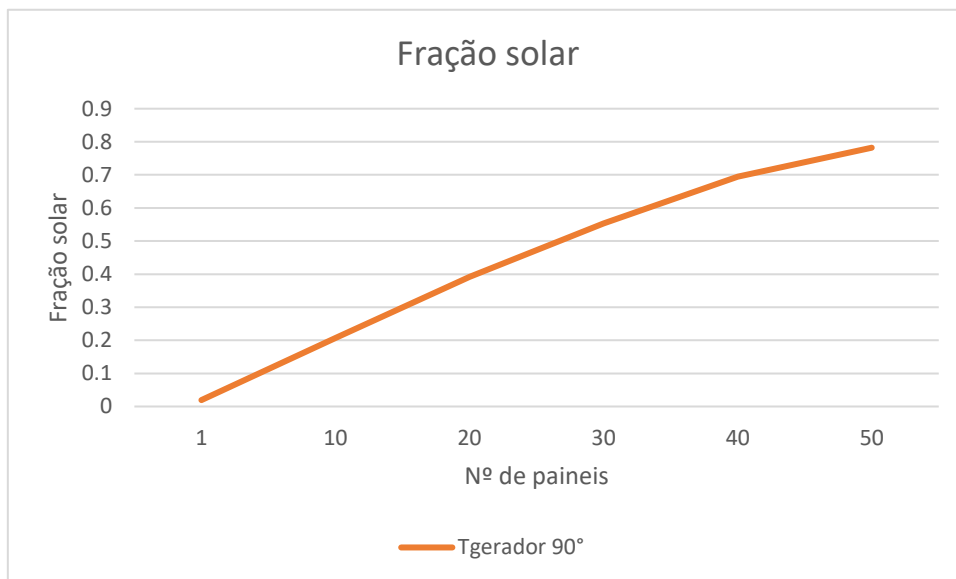


Figura 28 - Fração solar em função do número de painéis para Faro.

O valor máximo anual da fração solar é para 50 painéis solares térmicos. A fração solar aumenta com o aumento do número painéis e consequente área de captação.

Tabela 36 - Fração solar obtida para a cidade de Bragança com 50 painéis solares térmicos para Faro.

Meses	X	Y	f	Q _{solar} mensal	
	-	-	-	GJ	kWh
Janeiro	0,0459	0,5192	0,4682	16,89	4692,23
Fevereiro	0,0454	0,7561	0,6443	21,00	5831,96
Março	0,0447	1,0485	0,8314	30,00	8332,31
Abril	0,0440	1,2888	0,9624	33,60	9333,73
Mai	0,0428	1,4301	1,0000	36,08	10021,75
Junho	0,0411	1,6581	1,0000	34,91	9698,47
Julho	0,0397	1,7251	1,0000	36,08	10021,75
Agosto	0,0397	1,5699	1,0000	36,08	10021,75
Setembro	0,0406	1,2234	0,9289	32,43	9009,04
Outubro	0,0423	0,8020	0,6760	24,39	6774,72
Novembro	0,0440	0,5235	0,4717	16,47	4575,09
Dezembro	0,0452	0,4306	0,3965	14,30	3973,18

A fração solar anual para um conjunto de 50 painéis solares térmicos é de 0,78.

3.8.5 Resultados para a cidade de Lisboa

Para a cidade de Lisboa o cálculo foi feito segundo o melhor ângulo de inclinação, ou seja, o ângulo com mais irradiação incidente no painel solar térmico, essa inclinação foi de 30°.

Primeiramente será feita uma análise dos valores obtidos segundo a variação da temperatura do gerador e do número de painéis, figura 29. De seguida será apresentado os resultados dos parâmetros adimensionais (X e Y) e fração solar média mensal do sistema solar térmico correspondente ao valor máximo obtido em função do número de painéis, tabela 37.

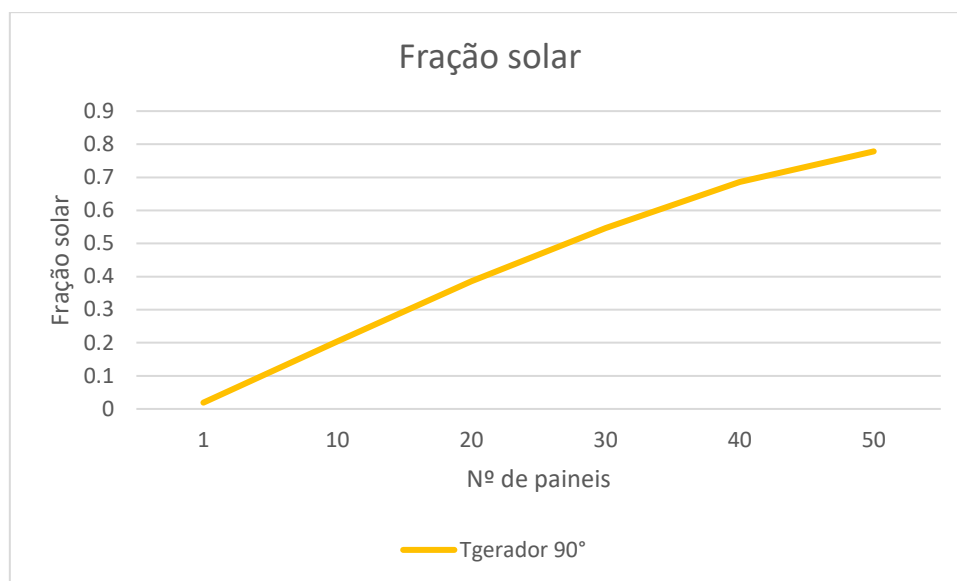


Figura 29 - Fração solar em função do número de painéis para Lisboa.

O valor máximo anual da fração solar é para 50 painéis solares térmicos. A fração solar aumenta com o aumento do número painéis e consequente área de captação.

Tabela 37 - Fração solar obtida para a cidade de Bragança com 50 painéis solares térmicos para Lisboa.

Meses	X	Y	f	Q _{solar} mensal	
	-	-	-	GJ	kWh
Janeiro	0,0462	0,4809	0,4376	15,79	4385,64
Fevereiro	0,0455	0,7209	0,6196	20,19	5608,58
Março	0,0446	1,0555	0,8355	30,15	8373,64
Abril	0,0441	1,3681	1,0000	34,91	9698,47
Mai	0,0430	1,5001	1,0000	36,08	10021,75
Junho	0,0414	1,5757	1,0000	34,91	9698,47
Julho	0,0402	1,6135	1,0000	36,08	10021,75
Agosto	0,0401	1,5205	1,0000	36,08	10021,75
Setembro	0,0407	1,2161	0,9251	32,30	8971,89
Outubro	0,0425	0,8273	0,6930	25,00	6945,52
Novembro	0,0444	0,5008	0,4537	15,84	4400,53
Dezembro	0,0456	0,3972	0,3685	13,29	3692,85

A fração solar anual para um conjunto de 50 painéis solares térmicos é de 0,78.

3.8.6 Resultados para a cidade de Porto

Para a cidade do Porto o cálculo foi feito segundo o melhor ângulo de inclinação, ou seja, o ângulo com mais irradiação incidente no painel solar térmico, essa inclinação foi de 30°.

Primeiramente será feita uma análise dos valores obtidos segundo a variação da temperatura do gerador e do número de painéis, figura 30. De seguida será apresentado os resultados dos parâmetros adimensionais (X e Y) e fração solar média mensal do sistema solar térmico correspondente ao valor máximo obtido em função do número de painéis, tabela 38.

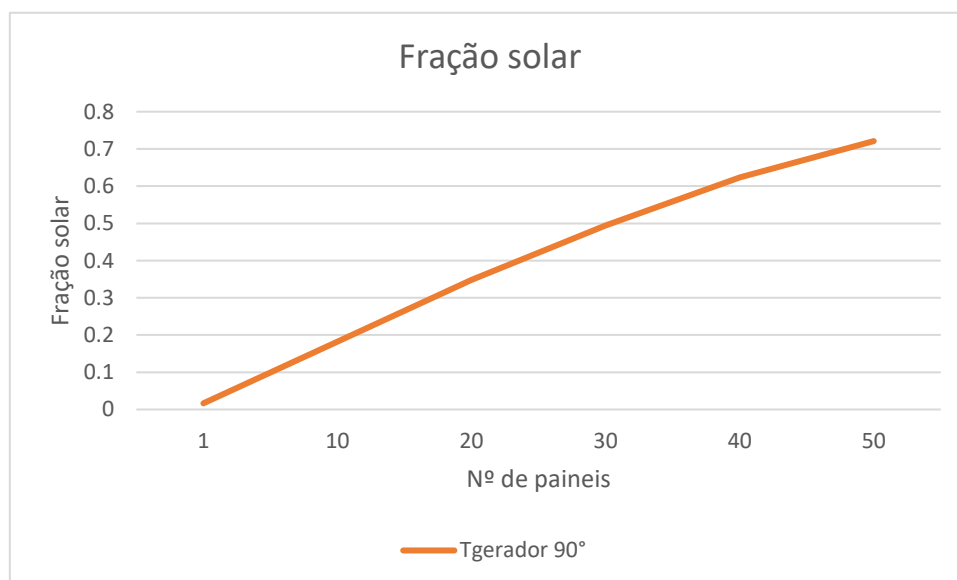


Figura 30 - Fração solar em função do número de painéis para Porto.

O valor máximo anual da fração solar é para 50 painéis solares térmicos. A fração solar aumenta com o aumento do número painéis e consequente área de captação.

Tabela 38 - Fração solar obtida para a cidade de Bragança com 50 painéis solares térmicos para Porto.

Meses	X	Y	f	Q _{solar} mensal	
	-	-	-	GJ	kWh
Janeiro	0,0472	0,3745	0,3491	12,59	3498,48
Fevereiro	0,0466	0,5969	0,5284	17,22	4783,45
Março	0,0458	0,9002	0,7405	26,71	7420,62
Abril	0,0452	1,2130	0,9231	32,23	8953,06
Mai	0,0441	1,3844	1,0000	36,08	10021,75
Junho	0,0425	1,5227	1,0000	34,91	9698,47
Julho	0,0415	1,5674	1,0000	36,08	10021,75
Agosto	0,0416	1,3953	1,0000	36,08	10021,75
Setembro	0,0422	1,0725	0,8456	29,52	8200,66
Outubro	0,0437	0,6779	0,5888	21,24	5900,75
Novembro	0,0455	0,4022	0,3727	13,01	3614,59
Dezembro	0,0465	0,3104	0,2934	10,59	2940,83

A fração solar anual para um conjunto de 50 painéis solares térmicos é de 0,72.

3.8.7 Resultados para a cidade de Viana do Castelo

Para a cidade de Viana do Castelo o cálculo foi feito segundo o melhor ângulo de inclinação, ou seja, o ângulo com mais irradiação incidente no painel solar térmico, essa inclinação foi de 40°.

Primeiramente será feita uma análise dos valores obtidos segundo a variação da temperatura do gerador e do número de painéis, figura 31. De seguida será apresentado os resultados dos parâmetros adimensionais (X e Y) e fração solar média mensal do sistema solar térmico correspondente ao valor máximo obtido em função do número de painéis, tabela 39.

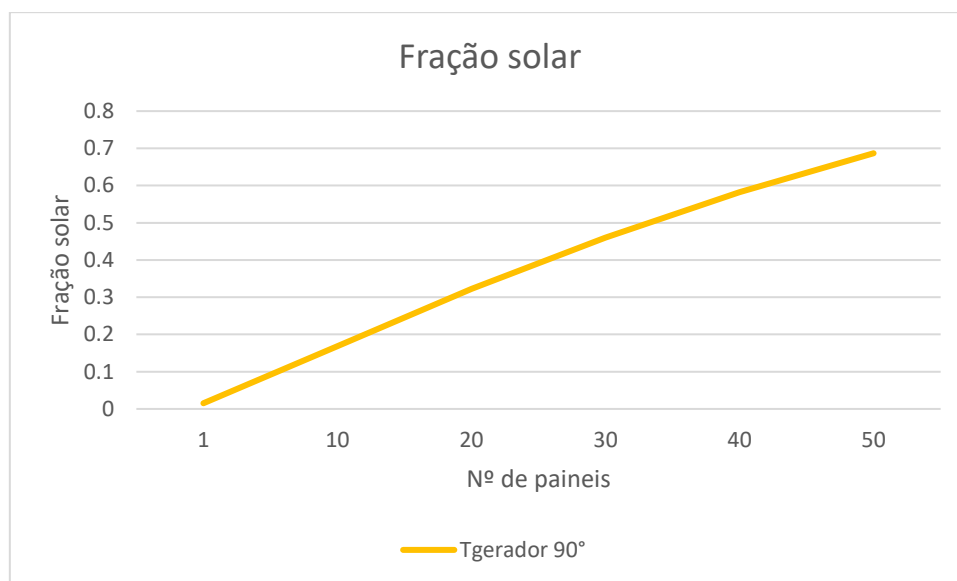


Figura 31 - Fração solar em função do número de painéis para Viana do Castelo.

O valor máximo anual da fração solar é para 50 painéis solares térmicos. A fração solar aumenta com o aumento do número painéis e consequente área de captação.

Tabela 39 - Fração solar obtida para a cidade de Bragança com 50 painéis solares térmicos para Viana do Castelo.

Meses	X	Y	f	Q _{solar} mensal	
	-	-	-	GJ	kWh
Janeiro	0,0436	0,3379	0,3177	12,38	3438,70
Fevereiro	0,0431	0,5499	0,4925	17,33	4814,68
Março	0,0424	0,8228	0,6900	26,88	7467,93
Abril	0,0417	1,1167	0,8708	32,83	9120,41
Mai	0,0408	1,2763	0,9563	37,26	10349,29
Junho	0,0392	1,4179	1,0000	37,70	10473,44
Julho	0,0383	1,4279	1,0000	38,96	10822,56
Agosto	0,0384	1,2848	0,9607	37,43	10397,71
Setembro	0,0391	0,9845	0,7936	29,92	8311,33
Outubro	0,0406	0,6196	0,5460	21,27	5909,16
Novembro	0,0422	0,3620	0,3386	12,77	3546,70
Dezembro	0,0430	0,2780	0,2648	10,32	2865,54

A fração solar anual para um conjunto de 50 painéis solares térmicos é de 0,69.

3.9 Estudo económico

Para a aplicabilidade do sistema interessa saber a sua viabilidade económica, qual o investimento inicial e quando haverá retorno do mesmo. O prazo de retorno do investimento (PRI), relaciona o custo do sistema, investimento inicial e as poupanças médias anuais esperadas, este pode ser calculado pela equação 3.5.

$$PRI = \frac{\text{custo do sistema}}{\text{economia anual}} \quad (3.5)$$

Para obter o valor de PRI é assim necessário saber qual o custo do sistema solar, os preços da energia praticados em Portugal (gás natural) e a economia anual para cada cidade em estudo. Para o caso de estudo foi verificado que com o aumento do número de painéis solares, a fração solar aumenta, aumentando assim a poupança anual. No entanto, o benefício associado a uma maior poupança anual tem como consequência um maior investimento inicial, pelo que, deve ser feita uma análise ponderada da relação custo/benefício.

3.9.1 Custo do sistema

Consultando o site da empresa Vulcano é possível encontrar um catálogo “Tabela de preços solar térmico” de 2017, com diferentes opções para o aproveitamento da energia solar térmica e os seus respetivos custos. Na figura 32 é apresentado parte do catálogo consultado, com o custo associado ao sistema escolhido para o caso em estudo. O preço mencionado nesta tabela é constituído pela soma de todos os componentes. O caso em estudo requer a utilização de um número elevado de painéis pelo que o valor selecionado é referente à instalação de quatro painéis, este valor foi ajustado ao número de painéis utilizados no presente caso de estudo. Esta foi a informação conseguida e aplicada para os cálculos, sendo que este valor em grande escala pode ser diferente.



Figura 32 - Sistema escolhido e preço atribuído. Fonte: Vulcano - Bosch Termotecnologia, S.A. (2017) – adaptada.

Ao valor apresentado acresce o imposto de valor agregado (IVA) praticado de 23%, assim, o valor aproximado do sistema fica o apresentado na tabela 40.

Tabela 40 - Custo do sistema solar térmico.

Preço sem IVA	Preço Final
5 571,00 €	6 852,33 €

3.9.2 Custo da energia elétrica em Portugal

Segundo a PORDATA³, base de dados de Portugal, o preço do gás natural em GJ aplicado em Portugal em 2019 (última atualização a 23-05-2020) a nível industrial é de 11,13 €/GJ, convertendo este valor para €/kWh, o preço do gás natural assume um valor de 0,040068 (PORDATA, 2020). Com este valor é possível calcular a poupança anual do sistema em estudo e consequentemente saber quantos anos são necessários para obter o retorno do investimento inicial do sistema. No tópico seguinte estão apresentados os cálculos e valores de PRI.

³ Disponível em: <https://www.pordata.pt/DB/Europa/Ambiente+de+Consulta/Tabela>

3.9.3 Resultados da economia anual e do PRI

Com os valores obtidos da fração solar no tópico 3.8 para cada cidade em estudo e com o custo do gás natural por kWh é possível determinar a poupança anual que o sistema oferece. As tabelas 41, 42 e 43, apresentam o valor da energia resultante do sistema solar térmico estudado e quanto esse valor representa em termos económicos, para cada cidade.

Tabela 41 - Economia anual em função da energia gerada pelo painel em Bragança e Castelo Branco.

Bragança		Castelo Branco	
kWh	€	kWh	€
3347,38	134,12 €	3993,78	160,02 €
4789,05	191,89 €	5111,65	204,81 €
7443,59	298,25 €	7679,90	307,72 €
8468,86	339,33 €	8734,02	349,96 €
9944,93	398,47 €	9702,87	388,78 €
10473,44	419,65 €	9698,47	388,60 €
10822,56	433,64 €	10021,75	401,55 €
10730,24	429,94 €	10021,75	401,55 €
8402,94	336,69 €	8544,32	342,35 €
5570,88	223,21 €	6107,39	244,71 €
3390,48	135,85 €	3867,72	154,97 €
2783,83	111,54 €	3341,69	133,90 €
Total anual	3 452,60 €	Total anual	3 478,93 €

Tabela 42 - Economia anual em função da energia gerada pelo painel em Évora e Faro.

Évora		Faro	
kWh	€	kWh	€
4381,98	175,58 €	4692,23	188,01 €
5449,82	218,36 €	5831,96	233,68 €
8048,83	322,50 €	8332,31	333,86 €
9013,73	361,16 €	9333,73	373,98 €
10021,75	401,55 €	10021,75	401,55 €
9698,47	388,60 €	9698,47	388,60 €
10021,75	401,55 €	10021,75	401,55 €
10021,75	401,55 €	10021,75	401,55 €
8656,06	346,83 €	9009,04	360,98 €
6343,10	254,16 €	6774,72	271,45 €
4195,19	168,09 €	4575,09	183,32 €
3651,19	146,30 €	3973,18	159,20 €
Total anual	3 586,24 €	Total anual	3 697,73 €

Tabela 43 - Economia anual em função da energia gerada pelo painel em Lisboa, Porto e Viana do Castelo.

Lisboa		Porto		Viana do Castelo	
kWh	€	kWh	€	kWh	€
4385,64	175,72 €	3498,48	140,18 €	3438,70	137,78 €
5608,58	224,73 €	4783,45	191,66 €	4814,68	192,91 €
8373,64	335,52 €	7420,62	297,33 €	7467,93	299,23 €
9698,47	388,60 €	8953,06	358,73 €	9120,41	365,44 €
10021,75	401,55 €	10021,75	401,55 €	10349,29	414,68 €
9698,47	388,60 €	9698,47	388,60 €	10473,44	419,65 €
10021,75	401,55 €	10021,75	401,55 €	10822,56	433,64 €
10021,75	401,55 €	10021,75	401,55 €	10397,71	416,62 €
8971,89	359,49 €	8200,66	328,59 €	8311,33	333,02 €
6945,52	278,29 €	5900,75	236,43 €	5909,16	236,77 €
4400,53	176,32 €	3614,59	144,83 €	3546,70	142,11 €
3692,85	147,97 €	2940,83	117,83 €	2865,54	114,82 €
Total anual	3 679,89 €	Total anual	3 408,84 €	Total anual	3 506,66 €

Os valores calculados para o PRI estão na expostos na tabela 44.

Tabela 44 - Tempo de retorno do investimento inicial para as diferentes cidades em estudo.

Cidade	Economia anual	PRI
Bragança	3 452,60 €	25 anos
Castelo Branco	3 478,93 €	25 anos
Évora	3 586,24 €	24 anos
Faro	3 697,73 €	23 anos
Lisboa	3 679,89 €	23 anos
Porto	3 408,84 €	25 anos
Viana do Castelo	3 506,66 €	24 anos

Os valores de PRI obtidos para as cidades em estudo são muito próximos uns dos outros, a variar entre os 23 e os 25 anos. As cidades de Faro e Lisboa obtiveram o menor valor de PRI, tendo também os valores de fração solar maiores. Por outro lado as cidades de Bragança, Castelo Branco e Porto obtiveram o maior valor de PRI. Considerando o tempo de vida útil do sistema solar térmico de aproximadamente 20 anos, torna-se inviável economicamente a instalação deste sistema. De salientar que o gás natural apresenta um baixo custo unitário quando comprado com outras fontes de energia.

Analisando os resultados obtidos para as diferentes áreas de captação consideradas, verificou-se que para um valor de área de captação inferior aos 50 painéis, o período de

retorno do investimento inicial é mais baixo, inferior a 20 anos, compensando assim a sua instalação. No caso da instalação de 40 painéis o PRI variava entre os 17 e 19 anos nas diferentes cidades, valores semelhantes para 30, 20 e 10 painéis.

CONCLUSÕES

4.1 CONCLUSÕES E PROPOSTA DE TRABALHOS FUTUROS

4 CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

4.1 CONCLUSÕES E PROPOSTA DE TRABALHOS FUTUROS

O presente caso de estudo, teve como base o estudo da aplicação e desempenho de um sistema de refrigeração por absorção LiBr/H₂O com recurso a energia solar. Para isso foi necessário saber a quantidade de energia que um painel solar recebe em função da sua localização geográfica, tendo sido utilizadas sete cidades portuguesas como referência geográfica à localização do painel (Bragança, Castelo Branco, Évora, Faro, Lisboa, Porto e Viana do Castelo), elas encontram-se distribuídas de norte a sul do país. Posto isto foi feita uma análise termodinâmica ao sistema e foram apresentadas as equações dos balanços de massa e de energia, para avaliar o seu desempenho. Por fim foi aplicado o método da fração solar para cada cidade em estudo, de modo a analisar a contribuição da energia solar no sistema em estudo.

A quantidade de radiação que chega a um painel inclinado relativamente à superfície foi calculada para cada cidade em estudo em função do ângulo de inclinação dado ao painel. Para as cidades de Bragança e Viana do Castelo o valor de irradiação apresentou o seu maior valor para uma inclinação do painel de 40° em relação à horizontal. Por outro lado, as restantes cidades, Castelo Branco, Évora, Faro, Lisboa e Porto apresentaram o seu maior valor de irradiação para uma inclinação do painel de 30°. Todas as cidades apresentam variações significativas ao longo do ano, sendo que para os meses de Inverno o valor da irradiação é menor relativamente aos meses de Verão. No caso de Bragança e Castelo Branco, o melhor ângulo de inclinação nos meses de Inverno seria 30°, já nos meses de Verão seria 40°, para as restantes cidades o melhor ângulo de inclinação foi sempre de 40°. As cidades que se encontram mais a Sul que é o

caso de Lisboa, Évora e Faro apresentam melhor potencial de irradiação, sendo Faro a cidade com o valor anual de irradiação mais elevado.

Um sistema de refrigeração por absorção LiBr/H₂O é composto por quatro componentes principais, gerador, condensador, evaporador e absorvedor. Para o cálculo da potência térmica associada ao gerador, foi necessário a realização de um balanço mássico e energético ao sistema. Posteriormente foram realizados quatro casos de estudo, onde foi feita a variação das temperaturas do gerador, absorvedor, evaporador e condensador para análise do desempenho do sistema em diferentes parâmetros de funcionamento.

No primeiro caso de estudo, foi atribuída uma temperatura fixa ao absorvedor, evaporador e condensador, fazendo-se variar as temperaturas do gerador. Os resultados obtidos mostram que o COP aumenta com o aumento da temperatura no gerador, atingindo o máximo para uma temperatura de 95°. No segundo caso de estudo, foi atribuída uma temperatura fixa ao evaporador e condensador, fazendo-se variar as temperaturas do gerador e absorvedor. Os resultados obtidos mostram que o COP sofre algumas oscilações com o aumento da temperatura do gerador e absorvedor. Quando a temperatura do absorvedor apresenta o seu menor valor, o COP aumenta até aos 75° do gerador, começando depois a diminuir até atingir um valor estável, não sendo um crescimento contínuo. Conclui-se assim que a temperatura no absorvedor deve estar entre os 30° e 40°. No terceiro caso de estudo foi atribuída uma temperatura fixa ao absorvedor e evaporador, fazendo-se variar as temperaturas do gerador e condensador. Os resultados obtidos mostram que com o aumento da temperatura do gerador o COP aumenta, por outro lado com o aumento da temperatura do absorvedor o COP diminui. Para valores de temperatura no condensador mais baixos, a variação do COP com o aumento da temperatura do gerador é quase constante. No quarto caso de estudo foi atribuída uma temperatura fixa ao absorvedor e evaporador, fazendo-se variar as temperaturas do gerador e condensador. Em comparação com o terceiro caso de estudo, neste a potência atribuída ao evaporador aumentou. Embora os resultados obtidos mostrem que com o aumento da temperatura no gerador o COP aumenta, o

aumento da potência no evaporador teve forte impacto no COP do sistema, em que quanto menor a temperatura do condensador menor COP.

Para os quatro casos de estudo conclui-se que o que apresentou melhores resultados de desempenho foi o caso de estudo 3.

A aplicação do método da fração solar nas cidades em estudo, teve como base os dados resultantes do cálculo da potência associada ao gerador, quando este se encontra a uma temperatura de 90° e a temperatura no condensador é de 30° . Cada cidade de estudo teve a mesma potência no cálculo da fração solar, variando apenas o valor da irradiação, o ângulo ideal de inclinação do painel e os coeficientes de absorção e transmissão. Para todas as cidades o maior valor da fração solar obtido foi para a utilização de 50 painéis, variando entre 68% e 78%. Ao longo de cada mês a variação da fração solar acompanhou a variação da irradiação que chega ao painel, sendo máxima nos meses de verão.

Em suma, o sistema de refrigeração por absorção LiBr/H₂O de simples efeito com recurso a energia solar, apresenta resultados satisfatórios, sendo a energia solar uma boa alternativa aos combustíveis fósseis utilizados para fornecer calor ao gerador a este tipo de sistema. Pelos valores obtidos do COP verifica-se que o sistema não consegue aproveitar o máximo com uma maior quantidade de calor fornecido ao sistema, o COP assume valores quase constante com o aumento da temperatura do gerador. Em relação à aplicabilidade económica do mesmo, deve ser feito um estudo pormenorizado das necessidades do sistema, para que a quantidade de painéis a ser aplicados sejam os suficientes para dar resposta e ao mesmo tempo se consiga um retorno do investimento inicial. Deve ser igualmente estudado um apoio para o painel nos meses em a irradiação recebida pelo painel não dê resposta às necessidades do sistema.

Como sugestão, o estudo da aplicação da energia solar a este tipo de sistemas poderia ser feita com a introdução de um permutador de calor entre o gerador e absorvedor, aproveitando assim os desperdícios energéticos internos do ciclo de absorção. A introdução de um permutador de calor no sistema permite um aumento do COP.

**BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES
DE INFORMAÇÃO**

5 BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO

Agency International Energy World Energy Outlook [Artigo]. - 2019.

Andrade Georgia, Soares Raiana e Haag Rafael OBTENÇÃO DO ÍNDICE DE CLARIDADE ATMOSFÉRICA PARA DIFERENTES LOCALIDADES DO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL [Artigo]. - 2018.

Anirban Sur et al. Review on solar adsorption refrigeration cycle [Diário] // International Journal of Mechanical Engineering and Technology (IJMET). - 2010. - pp. 190-226.

Bach Johann Sebastian Planning and installing solar thermal systems : a guide for installers, architects, and engineers. [Livro]. - London : [s.n.], 2010.

Baig Maughal e Reddy Avala Utilization of f-Chart Method for Designing Solar Thermal Heating System [Artigo]. - 2016.

Bhatia S. C. Advanced Renewable energy Systems [Livro]. - India : WPI, 2014. - Vol. Parte I.

Duffie John A. e Beckman William A. Solar Engineering of Thermal Processes [Livro]. - [s.l.] : WILEY, 2013.

Earthscan Planning & Installing Solar Thermal Systems [Livro]. - London, Washington DC : earthscan , 2005.

Foster Robert, Ghassemi Majid e Cota Alma Solar Energy - Renewable energy and the environment [Livro]. - [s.l.] : CRC Press, 2009.

IEA <https://www.iea.org> [Online] // <https://www.iea.org/fuels-and-technologies/cooling>. - Dezembro de 2019.

IEA Renewable energy market update [Artigo]. - Maio de 2020.

IEA Space cooling: More access, more comfort, less energy [Artigo]. - 2017.

Kalogirou Soteris Solar energy engineering : processes and systems [Livro]. - [s.l.] : Elsevier, 2009.

Ketfi Omar, Merzouk Mustapha e Nachida e Metenan Said Performance of a Single Effect Solar Absorption Cooling System [Artigo]. - 2015.

Majdi Hasan Sh. Performance evaluation of combined ejector LiBr/H₂O absorption cooling cycle [Artigo]. - 12 de Janeiro de 2016.

Nikbakhti Rasoul e et al. Absorption cooling systems – Review of various [Artigo]. - 21 de Fevereiro de 2020.

Park Hong-Seok e Dang Xuan-Phuong [Artigo] // Design and Simulation-Based Optimization of Cooling Channels for Plastic Injection Mold. - South Korea : University of Ulsan, 2011.

PORDATA Preços do gás natural para utilizadores domésticos e industriais (Euro). - 2020.

Prasartkaew Boonrit Performance Test of a Small Size LiBr-H₂O Absorption Chiller [Artigo]. - Thailand : ELSEVIER, 2014.

Roriz Luís [et al.] Energia Solar em Edifícios [Livro]. - [s.l.] : ORION, 2010.

Roser Hannah Ritchi and Max Energy [Artigo]. - 2020.

Silva Sérgio Luis Sistemática para o Projeto do Sistema de Refrigeração de Moldes para Injeção de Polímeros [Relatório]. - Florianópolis : Universidade Federal de Santa Catarina, 2009.

Stoecker Wilbert F. e Jones Jerold W. Refrigeration and Air Conditioning [Livro]. - [s.l.] : McGraw-Hill, 1985.

Vardavas Ilias e Taylor Fredric William Radiation and Climate [Livro]. - [s.l.] : OXFORD - University Press, 2006.

Vulcano www.vulcano.pt [Online] // Vulcano. - 2018.

ANEXOS

- 6.1 VALORES OBTIDOS PARA O CÁLCULO DA IRRADIAÇÃO
- 6.2 DADOS DOS VALORES CALCULADOS PARA O RESULTADO DA FRAÇÃO SOLAR.
- 6.3 FICHA TÉCNICA DO PAINEL SOLAR

6 ANEXOS

6.1 Valores obtidos para o cálculo da irradiação

Tabela 1 - Dados calculados para obtenção dos valores mensais de irradiação para Bragança, parte 1.

Meses	Índice de claridade (k_T)	Declinação δ (°)	Hss (°)	Hmin (°)	S_{oh}^d (J/m ² .dia)	G (J/m ² .dia)	Rdif/G (J/m ² .dia)	Rdir
Janeiro	0.450	-20.917	69.814	1.218	1.41E+07	6.33E+06	0.385	0.875
Fevereiro	0.500	-12.955	77.911	1.360	1.95E+07	9.73E+06	0.381	0.952
Março	0.530	-2.418	87.600	1.529	2.66E+07	1.41E+07	0.392	0.998
Abril	0.510	9.415	98.272	1.576	3.41E+07	1.74E+07	0.441	0.986
Mai	0.540	18.792	107.440	1.582	3.95E+07	2.13E+07	0.447	0.947
Junho	0.620	23.086	112.119	1.584	4.17E+07	2.59E+07	0.404	0.914
Julho	0.650	22.108	111.017	1.584	4.11E+07	2.67E+07	0.383	0.924
Agosto	0.640	13.455	102.091	1.578	3.61E+07	2.31E+07	0.366	0.972
Setembro	0.580	2.217	91.740	1.572	2.92E+07	1.70E+07	0.373	0.999
Outubro	0.470	-9.599	81.077	1.415	2.15E+07	1.01E+07	0.412	0.974
Novembro	0.440	-18.912	71.954	1.256	1.53E+07	6.74E+06	0.399	0.903
Dezembro	0.420	-23.050	67.441	1.177	1.26E+07	5.30E+06	0.395	0.850

Tabela 2 - Dados calculados para obtenção dos valores mensais de irradiação para Bragança, parte 2.

Meses	Direta		Difusa		Albedo		Irradiação	I_{β} (J/(m ² .dia))	I_{β} (kWh/(m ² .dia))
	$(1 - R_{dif}/G) \cdot R_{dir}$	J/(m ² .dia)	$R_{dif}/G \cdot (1 + \cos\beta) / 2$	J/(m ² .dia)	$\rho \cdot (1 - \cos\beta) / 2$	J/(m ² .dia)			
Janeiro	0.54	3410857.80	0.34	2149226.11	0.012	74463.64	0.89	5.63E+06	1.57
Fevereiro	0.59	5736826.74	0.34	3268647.61	0.012	114417.70	0.94	9.12E+06	2.53
Março	0.61	8530949.68	0.35	4872983.41	0.012	165452.04	0.96	1.36E+07	3.77
Abril	0.55	9575484.77	0.39	6762029.92	0.012	204318.32	0.95	1.65E+07	4.59
Maió	0.52	11161405.28	0.39	8415016.52	0.012	250730.29	0.93	1.98E+07	5.51
Junho	0.54	14089730.21	0.36	9228144.44	0.012	304244.93	0.91	2.36E+07	6.56
Julho	0.57	15213707.57	0.34	9029003.92	0.012	313993.79	0.92	2.46E+07	6.82
Agosto	0.62	14252129.57	0.32	7468163.22	0.012	271840.01	0.95	2.20E+07	6.11
Setembro	0.63	10616294.87	0.33	5580143.19	0.012	199344.22	0.97	1.64E+07	4.55
Outubro	0.57	5792727.29	0.36	3673877.64	0.012	118889.36	0.95	9.59E+06	2.66
Novembro	0.54	3657350.90	0.35	2374052.51	0.012	79254.82	0.91	6.11E+06	1.70
Dezembro	0.51	2725135.37	0.35	1848446.11	0.012	62324.39	0.87	4.64E+06	1.29

Tabela 3 - Dados calculados para obtenção dos valores mensais de irradiação para Castelo Branco parte 1.

Meses	Índice de claridade (k_T)	Declinação δ (°)	Hss (°)	Hmin (°)	S_{oh}^d (J/m ² .dia)	G (J/m ² .dia)	Rdif/G (J/m ² .dia)	Rdir
Janeiro	0.50	-20.917	71.219	1.243	1.53E+07	7.65E+06	0.358	0.868
Fevereiro	0.51	-12.955	78.725	1.374	2.06E+07	1.05E+07	0.377	0.945
Março	0.54	-2.418	87.746	1.531	2.75E+07	1.48E+07	0.386	0.985
Abril	0.54	9.415	97.690	1.599	3.46E+07	1.87E+07	0.417	0.955
Mai	0.55	18.792	106.205	1.630	3.97E+07	2.18E+07	0.436	0.884
Junho	0.63	23.086	110.529	1.645	4.17E+07	2.63E+07	0.394	0.923
Julho	0.67	22.108	109.512	1.641	4.11E+07	2.75E+07	0.369	0.913
Agosto	0.65	13.455	101.242	1.612	3.65E+07	2.37E+07	0.359	0.959
Setembro	0.59	2.217	91.606	1.577	3.00E+07	1.77E+07	0.367	0.984
Outubro	0.50	-9.599	81.670	1.425	2.26E+07	1.13E+07	0.393	0.966
Novembro	0.47	-18.912	73.198	1.278	1.65E+07	7.77E+06	0.384	0.894
Dezembro	0.46	-23.050	69.029	1.205	1.39E+07	6.37E+06	0.375	0.851

Tabela 4 - Dados calculados para obtenção dos valores mensais de irradiação para Castelo Branco parte 2.

Meses	Direta		Difusa		Albedo		Irradiação	I_{β} (J/(m ² .dia))	I_{β} (kWh/(m ² .dia))
	$(1 - R_{dif}/G) * R_{di}$ r		$R_{dif}/G * (1 + \cos\beta) / 2$		$\rho * (1 - \cos\beta) / 2$				
	-	J/(m ² .dia)	-	J/(m ² .dia)	-	J/(m ² .dia)			
Janeiro	0.56	4259762.28	0.33	2556378.28	0.007	51513.2544	0.90	6.87E+06	1.91
Fevereiro	0.59	6185265.80	0.35	3694916.18	0.007	70772.7118	0.95	9.95E+06	2.76
Março	0.60	8964832.46	0.36	5346162.14	0.007	99912.9693	0.97	1.44E+07	4.00
Abril	0.56	10406888.31	0.39	7273615.62	0.007	125916.777	0.95	1.78E+07	4.95
Mai	0.50	10885537.17	0.41	8869003.07	0.007	146912.323	0.91	1.99E+07	5.53
Junho	0.56	14712368.11	0.37	9650530.61	0.007	176972.354	0.93	2.45E+07	6.82
Julho	0.58	15888346.79	0.34	9466757.79	0.007	185481.069	0.93	2.55E+07	7.09
Agosto	0.62	14605334.68	0.33	7937573.80	0.007	159856.966	0.96	2.27E+07	6.31
Setembro	0.62	11037978.45	0.34	6055491.78	0.007	119259.641	0.97	1.72E+07	4.78
Outubro	0.59	6618952.23	0.37	4142445.21	0.007	76061.9903	0.96	1.08E+07	3.01
Novembro	0.55	4278569.81	0.36	2780547.52	0.007	52300.9297	0.92	7.11E+06	1.98
Dezembro	0.53	3386412.19	0.35	2230320.31	0.007	42903.0357	0.89	5.66E+06	1.57

Tabela 5 - Dados calculados para obtenção dos valores mensais de irradiação para Évora, parte 1.

Meses	Índice de claridade (k_T)	Declinação δ (°)	Hss (°)	Hmin (°)	S_{oh}^d (J/m ² .dia)	G (J/m ² .dia)	Rdif/G (J/m ² .dia)	Rdir
Janeiro	0.52	-20.917	72.055	1.258	1.61E+07	8.36E+06	0.349	0.888
Fevereiro	0.53	-12.955	79.212	1.383	2.13E+07	1.13E+07	0.366	0.948
Março	0.56	-2.418	87.834	1.533	2.80E+07	1.57E+07	0.374	0.988
Abril	0.55	9.415	97.343	1.596	3.50E+07	1.92E+07	0.409	0.978
Mai	0.56	18.792	105.469	1.622	3.98E+07	2.23E+07	0.426	0.931
Junho	0.63	23.086	109.584	1.635	4.17E+07	2.63E+07	0.391	0.910
Julho	0.66	22.108	108.617	1.632	4.11E+07	2.71E+07	0.372	0.916
Agosto	0.65	13.455	100.735	1.607	3.68E+07	2.39E+07	0.357	0.964
Setembro	0.59	2.217	91.525	1.577	3.05E+07	1.80E+07	0.366	0.987
Outubro	0.51	-9.599	82.025	1.432	2.33E+07	1.19E+07	0.388	0.960
Novembro	0.49	-18.912	73.939	1.290	1.73E+07	8.47E+06	0.374	0.900
Dezembro	0.48	-23.050	69.971	1.221	1.46E+07	7.02E+06	0.366	0.850

Tabela 6 - Dados calculados para obtenção dos valores mensais de irradiação para Évora, parte 2.

Meses	Direta		Difusa		Albedo		Irradiação	I_{β} (J/(m ² .dia))	I_{β} (kWh/(m ² .dia))
	$(1 - R_{dif}/G) \cdot R_{dir}$	J/(m ² .dia)	$R_{dif}/G \cdot (1 + \cos\beta)/2$	J/(m ² .dia)	$\rho \cdot (1 - \cos\beta)/2$	J/(m ² .dia)			
Janeiro	0.58	4827731.26	0.33	2721452.23	0.007	56266.57	0.91	7.61E+06	2.11
Fevereiro	0.60	6790222.16	0.34	3856918.43	0.007	76082.40	0.95	1.07E+07	2.98
Março	0.62	9717997.72	0.35	5476121.41	0.007	105746.14	0.97	1.53E+07	4.25
Abril	0.58	11118320.56	0.38	7334031.57	0.007	129467.21	0.97	1.86E+07	5.16
Mai	0.53	11895340.35	0.40	8853605.58	0.007	149934.32	0.94	2.09E+07	5.81
Junho	0.55	14556442.83	0.36	9583456.17	0.007	176850.42	0.93	2.43E+07	6.75
Julho	0.58	15621482.66	0.35	9403960.95	0.007	182711.60	0.93	2.52E+07	7.00
Agosto	0.62	14795622.66	0.33	7959113.66	0.007	160864.46	0.96	2.29E+07	6.37
Setembro	0.63	11256784.10	0.34	6147719.76	0.007	121150.77	0.97	1.75E+07	4.87
Outubro	0.59	6970717.97	0.36	4289230.89	0.007	79865.74	0.96	1.13E+07	3.15
Novembro	0.56	4774564.77	0.35	2950422.23	0.007	57013.80	0.92	7.78E+06	2.16
Dezembro	0.54	3782552.85	0.34	2397617.79	0.007	47270.28	0.89	6.23E+06	1.73

Tabela 7 - Dados calculados para obtenção dos valores mensais de irradiação para Faro, parte 1.

Meses	Índice de claridade	Declinação δ (°)	Hss (°)	Hmin (°)	S_{oh}^d (J/m ² .dia)	G (J/m ² .dia)	Rdif/G (J/m ² .dia)	Rdir
Janeiro	0.53	-20.917	73.049	1.275	1.70E+07	9.02E+06	0.347	0.888
Fevereiro	0.55	-12.955	79.793	1.393	2.22E+07	1.22E+07	0.356	0.953
Março	0.57	-2.418	87.939	1.535	2.87E+07	1.64E+07	0.368	0.993
Abril	0.57	9.415	96.927	1.591	3.53E+07	2.01E+07	0.394	0.980
Mai	0.58	18.792	104.593	1.613	3.99E+07	2.31E+07	0.410	0.935
Junho	0.65	23.086	108.462	1.623	4.16E+07	2.71E+07	0.377	0.913
Julho	0.68	22.108	107.554	1.621	4.11E+07	2.79E+07	0.359	0.920
Agosto	0.67	13.455	100.130	1.600	3.70E+07	2.48E+07	0.346	0.951
Setembro	0.61	2.217	91.429	1.576	3.11E+07	1.89E+07	0.355	0.991
Outubro	0.53	-9.599	82.449	1.439	2.41E+07	1.28E+07	0.376	0.969
Novembro	0.51	-18.912	74.823	1.306	1.82E+07	9.29E+06	0.364	0.908
Dezembro	0.49	-23.050	71.091	1.241	1.56E+07	7.64E+06	0.364	0.862

Tabela 8 - Dados calculados para obtenção dos valores mensais de irradiação para Faro, parte 2.

Meses	Direta		Difusa		Albedo		Irradiação	I β (J/(m ² .dia))	I β (kWh/(m ² .dia))
	(1-Rdif/G)*Rdir -	J/(m ² .dia)	Rdif/G*(1+COS β)/2 -	J/(m ² .dia)	ρ *(1-COS β)/2 -	J/(m ² .dia)			
Janeiro	0.58	5236815.13	0.32	2916265.93	0.007	60750.27	0.91	8.21E+06	2.28
Fevereiro	0.61	7490761.67	0.33	4049748.05	0.007	82181.05	0.95	1.16E+07	3.23
Março	0.63	10277825.22	0.34	5621172.14	0.007	110262.16	0.98	1.60E+07	4.45
Abril	0.59	11959138.91	0.37	7408799.33	0.007	135661.50	0.97	1.95E+07	5.42
Mai	0.55	12750881.62	0.38	8834829.48	0.007	155660.22	0.94	2.17E+07	6.04
Junho	0.57	15405683.65	0.35	9507866.70	0.007	182226.11	0.93	2.51E+07	6.97
Julho	0.59	16489565.30	0.33	9347883.18	0.007	188158.89	0.93	2.60E+07	7.23
Agosto	0.62	15438468.74	0.32	7994685.71	0.007	167007.97	0.95	2.36E+07	6.56
Setembro	0.64	12121218.55	0.33	6267564.80	0.007	127605.51	0.98	1.85E+07	5.14
Outubro	0.60	7709582.89	0.35	4475814.11	0.007	85897.00	0.96	1.23E+07	3.41
Novembro	0.58	5361065.65	0.34	3154408.78	0.007	62541.24	0.92	8.58E+06	2.38
Dezembro	0.55	4186141.55	0.34	2592336.45	0.007	51429.77	0.89	6.83E+06	1.90

Tabela 9 - Dados calculados para obtenção dos valores mensais de irradiação para Lisboa , parte 1.

Meses	Índice de claridade (k_T)	Declinação δ (°)	Hss (°)	Hmin (°)	S_{oh}^d (J/m ² .dia)	G (J/m ² .dia)	Rdif/G (J/m ² .dia)	Rdir
Janeiro	0.52	-20.917	71.956	1.256	1.60E+07	8.31E+06	0.349	0.897
Fevereiro	0.55	-12.955	79.154	1.381	2.12E+07	1.17E+07	0.354	0.947
Março	0.59	-2.418	87.824	1.533	2.80E+07	1.65E+07	0.356	0.988
Abril	0.61	9.415	97.384	1.596	3.49E+07	2.13E+07	0.371	0.979
Mai	0.61	18.792	105.557	1.623	3.98E+07	2.42E+07	0.393	0.931
Junho	0.62	23.086	109.697	1.636	4.17E+07	2.58E+07	0.398	0.910
Julho	0.64	22.108	108.723	1.633	4.11E+07	2.63E+07	0.383	0.916
Agosto	0.65	13.455	100.796	1.607	3.67E+07	2.39E+07	0.357	0.963
Setembro	0.62	2.217	91.535	1.577	3.04E+07	1.89E+07	0.349	0.987
Outubro	0.57	-9.599	81.982	1.431	2.32E+07	1.32E+07	0.351	0.957
Novembro	0.52	-18.912	73.851	1.289	1.72E+07	8.94E+06	0.355	0.900
Dezembro	0.49	-23.050	69.859	1.219	1.45E+07	7.12E+06	0.360	0.848

Tabela 10 - Dados calculados para obtenção dos valores mensais de irradiação para Lisboa , parte 2.

Meses	Direta		Difusa		Albedo		Irradiação	I_{β} (J/(m ² .dia))	I_{β} (kWh/(m ² .dia))
	$(1-R_{dif}/G)*R_{dir}$	J/(m ² .dia)	$R_{dif}/G*(1+COS\beta)/2$	J/(m ² .dia)	$\rho*(1-COS\beta)/2$	J/(m ² .dia)			
Janeiro	4849840.72	0.33	2703262.86	0.007	55941.57	0.92	7.61E+06	2.11	4849840.72
Fevereiro	7149243.83	0.33	3854020.81	0.007	78637.25	0.95	1.11E+07	3.08	7149243.83
Março	10501447.13	0.33	5479753.00	0.007	111142.42	0.97	1.61E+07	4.47	10501447.13
Abril	13117832.16	0.35	7365169.50	0.007	143431.00	0.97	2.06E+07	5.73	13117832.16
Mai	13698943.12	0.37	8884754.69	0.007	163278.34	0.94	2.27E+07	6.32	13698943.12
Junho	14172816.58	0.37	9588063.11	0.007	174060.72	0.93	2.39E+07	6.65	14172816.58
Julho	14865590.69	0.36	9400786.18	0.007	177178.13	0.93	2.44E+07	6.79	14865590.69
Agosto	14771948.67	0.33	7956650.93	0.007	160746.31	0.96	2.29E+07	6.36	14771948.67
Setembro	12118181.05	0.33	6149928.32	0.007	127074.06	0.97	1.84E+07	5.11	12118181.05
Outubro	8209232.31	0.33	4320816.18	0.007	88955.50	0.96	1.26E+07	3.51	8209232.31
Novembro	5185971.31	0.33	2959153.54	0.007	60186.19	0.92	8.21E+06	2.28	5185971.31
Dezembro	3863958.27	0.34	2388893.62	0.007	47946.47	0.88	6.30E+06	1.75	3863958.27

Tabela 11 - Dados calculados para obtenção dos valores mensais de irradiação para o Porto , parte 1.

Meses	Índice de claridade (k_T)	Declinação δ (°)	Hss (°)	Hmin (°)	S_{oh}^d (J/m ² .dia)	G (J/m ² .dia)	Rdif/G (J/m ² .dia)	Rdir
Janeiro	0.46	-20.917	70.283	1.227	1.45E+07	6.66E+06	0.380	0.859
Fevereiro	0.50	-12.955	78.182	1.365	1.98E+07	9.92E+06	0.382	0.917
Março	0.53	-2.418	87.649	1.530	2.69E+07	1.42E+07	0.393	0.980
Abril	0.56	9.415	98.078	1.603	3.43E+07	1.92E+07	0.404	0.964
Mai	0.57	18.792	107.028	1.638	3.96E+07	2.25E+07	0.424	0.930
Junho	0.61	23.086	111.588	1.655	4.17E+07	2.55E+07	0.409	0.888
Julho	0.62	22.108	110.514	1.651	4.11E+07	2.55E+07	0.400	0.926
Agosto	0.61	13.455	101.808	1.618	3.63E+07	2.21E+07	0.383	0.954
Setembro	0.57	2.217	91.695	1.578	2.95E+07	1.68E+07	0.379	0.980
Outubro	0.50	-9.599	81.274	1.419	2.19E+07	1.09E+07	0.392	0.958
Novembro	0.46	-18.912	72.369	1.263	1.57E+07	7.23E+06	0.387	0.889
Dezembro	0.43	-23.050	67.972	1.186	1.30E+07	5.60E+06	0.391	0.839

Tabela 12 - Dados calculados para obtenção dos valores mensais de irradiação para o Porto , parte 2.

Meses	Direta		Difusa		Albedo		Irradiação	I_{β} (J/(m ² .dia))	I_{β} (kWh/(m ² .dia))
	$(1 - R_{dif}/G) \cdot R_{dir}$	J/(m ² .dia)	$R_{dif}/G \cdot (1 + \cos\beta)/2$	J/(m ² .dia)	$\rho \cdot (1 - \cos\beta)/2$	J/(m ² .dia)			
Janeiro	0.53	3546136.26	0.35	2358821.93	0.007	44833.61	0.89	5.95E+06	1.65
Fevereiro	0.57	5626673.92	0.36	3529858.78	0.007	66793.11	0.93	9.22E+06	2.56
Março	0.60	8473511.08	0.37	5211823.83	0.007	95847.17	0.97	1.38E+07	3.83
Abril	0.57	11018792.25	0.38	7235068.03	0.007	129185.47	0.96	1.84E+07	5.11
Mai	0.54	12083755.56	0.40	8910418.72	0.007	151809.90	0.94	2.11E+07	5.87
Junho	0.52	13356499.68	0.38	9715565.82	0.007	171421.25	0.91	2.32E+07	6.46
Julho	0.56	14155489.82	0.37	9502959.28	0.007	171578.21	0.94	2.38E+07	6.62
Agosto	0.59	13031297.40	0.36	7894964.13	0.007	148936.52	0.95	2.11E+07	5.85
Setembro	0.61	10226624.91	0.35	5942651.90	0.007	113197.48	0.97	1.63E+07	4.52
Outubro	0.58	6369290.94	0.37	3996353.28	0.007	73626.95	0.95	1.04E+07	2.90
Novembro	0.54	3935302.26	0.36	2611644.49	0.007	48673.91	0.91	6.60E+06	1.83
Dezembro	0.51	2862142.34	0.36	2040182.56	0.007	37704.39	0.88	4.94E+06	1.37

Tabela 13 - Dados calculados para obtenção dos valores mensais de irradiação para Viana do Castelo , parte 1.

Meses	Índice de claridade (k_T)	Declinação δ (°)	Hss (°)	Hmin (°)	S_{oh}^d (J/m ² .dia)	G (J/m ² .dia)	Rdif/G (J/m ² .dia)	Rdir
Janeiro	0.46	-20.917	69.898	1.220	1.41E+07	6.51E+06	0.378	0.876
Fevereiro	0.50	-12.955	77.959	1.361	1.95E+07	9.76E+06	0.381	0.952
Março	0.53	-2.418	87.608	1.529	2.66E+07	1.41E+07	0.392	0.998
Abril	0.56	9.415	98.237	1.576	3.41E+07	1.91E+07	0.405	0.986
Mai	0.57	18.792	107.367	1.581	3.95E+07	2.25E+07	0.425	0.947
Junho	0.61	23.086	112.025	1.583	4.17E+07	2.55E+07	0.410	0.916
Julho	0.62	22.108	110.927	1.583	4.11E+07	2.55E+07	0.401	0.923
Agosto	0.61	13.455	102.040	1.578	3.61E+07	2.21E+07	0.383	0.972
Setembro	0.57	2.217	91.732	1.572	2.93E+07	1.67E+07	0.379	0.999
Outubro	0.50	-9.599	81.112	1.416	2.16E+07	1.08E+07	0.391	0.974
Novembro	0.46	-18.912	72.028	1.257	1.54E+07	7.08E+06	0.386	0.902
Dezembro	0.43	-23.050	67.536	1.179	1.27E+07	5.46E+06	0.389	0.851

Tabela 14 - Dados calculados para obtenção dos valores mensais de irradiação para Viana do Castelo , parte 2.

Meses	Direta		Difusa		Albedo		Irradiação	I_{β} (J/(m ² .dia))	I_{β} (kWh/(m ² .dia))
	$(1 - R_{dif}/G) \cdot R_{dir}$	J/(m ² .dia)	$R_{dif}/G \cdot (1 + \cos\beta)/2$	J/(m ² .dia)	$\rho \cdot (1 - \cos\beta)/2$	J/(m ² .dia)			
Janeiro	0.54	3542705.59	0.33	2172913.70	0.012	76500.34	0.89	5.79E+06	1.61
Fevereiro	0.59	5755980.06	0.34	3281193.50	0.012	114808.21	0.94	9.15E+06	2.54
Março	0.61	8548514.67	0.35	4883272.72	0.012	165789.83	0.96	1.36E+07	3.78
Abril	0.59	11205913.58	0.36	6822844.28	0.012	224566.84	0.96	1.83E+07	5.07
Mai	0.54	12263947.89	0.37	8439246.48	0.012	264734.86	0.93	2.10E+07	5.82
Junho	0.54	13757014.49	0.36	9219316.14	0.012	299336.12	0.91	2.33E+07	6.47
Julho	0.55	14082682.33	0.35	9013557.59	0.012	299519.63	0.92	2.34E+07	6.50
Agosto	0.60	13222965.92	0.34	7459261.46	0.012	259268.99	0.95	2.09E+07	5.82
Setembro	0.62	10347872.03	0.33	5583237.21	0.012	196217.14	0.97	1.61E+07	4.48
Outubro	0.59	6395769.04	0.35	3725506.89	0.012	126846.25	0.95	1.02E+07	2.85
Novembro	0.55	3918055.97	0.34	2412207.68	0.012	83233.58	0.91	6.41E+06	1.78
Dezembro	0.52	2836376.97	0.34	1873284.16	0.012	64165.65	0.87	4.77E+06	1.33

6.2 Dados dos valores calculados para o resultado da fração solar.

Tabela 15 - Dados calculados para obtenção das frações solares em Bragança.

Meses	β	T_a	Δt	N	Total	$(\tau\alpha)_n$	A_{abs}	Pger	Pger	X	Y	f	$Q_{solar\ mensal}$	Fração anual solar
	(J/(m2.dia))	°C	s	dia	$\tau\alpha/(\tau\alpha)_n$		m ²	J	GJ				GJ	
Janeiro	5.63E+06	4.4	2678400	31	0.877	0.827	109	3.90E+10	38.961	0.046	0.328	0.309	12.051	
Fevereiro	9.12E+06	6.26	2419200	28	0.902	0.827	109	3.52E+10	35.191	0.045	0.547	0.490	17.241	
Março	1.36E+07	8.62	2678400	31	0.909	0.827	109	3.90E+10	38.961	0.044	0.820	0.688	26.797	
Abril	1.65E+07	10.18	2592000	30	0.919	0.827	109	3.77E+10	37.704	0.043	1.010	0.809	30.488	
Maiο	1.98E+07	13.48	2678400	31	0.915	0.827	109	3.90E+10	38.961	0.042	1.205	0.919	35.802	
Junho	2.36E+07	17.9	2592000	30	0.915	0.827	109	3.77E+10	37.704	0.040	1.436	1.000	37.704	
Julho	2.46E+07	21.31	2678400	31	0.918	0.827	109	3.90E+10	38.961	0.038	1.498	1.000	38.961	
Agosto	2.20E+07	21.14	2678400	31	0.922	0.827	109	3.90E+10	38.961	0.038	1.347	0.991	38.629	
Setembro	1.64E+07	18.14	2592000	30	0.917	0.827	109	3.77E+10	37.704	0.039	0.999	0.802	30.251	
Outubro	9.59E+06	12.84	2678400	31	0.909	0.827	109	3.90E+10	38.961	0.042	0.579	0.515	20.055	
Novembro	6.11E+06	8.23	2592000	30	0.849	0.827	109	3.77E+10	37.704	0.044	0.345	0.324	12.206	
Dezembro	4.64E+06	5.55	2678400	31	0.876	0.827	109	3.90E+10	38.961	0.046	0.270	0.257	10.022	
Total									458.74				310.206	0.676

Tabela 16 - Dados calculados para obtenção das frações solares em Castelo Branco.

Meses	β	T_a	Δt	N	Total	$(\tau\alpha)_n$	A_{abs}	Pger	Pger	X	Y	f	$Q_{solar\ mensal}$	Fração anual solar
	(J/(m ² .dia))	°C	s	dia	$\tau\alpha/(\tau\alpha)_n$		m ²	J	GJ				GJ	
Janeiro	6.87E+06	7.88	2678400	31	0.879	0.827	109	3.61E+10	36.078	0.048	0.433	0.399	14.378	
Fevereiro	9.95E+06	9.63	2419200	28	0.904	0.827	109	3.26E+10	32.587	0.047	0.645	0.565	18.402	
Março	1.44E+07	12.76	2678400	31	0.910	0.827	109	3.61E+10	36.078	0.045	0.941	0.766	27.648	
Abril	1.78E+07	13.09	2592000	30	0.917	0.827	109	3.49E+10	34.915	0.045	1.171	0.901	31.443	
Mai	1.99E+07	17.03	2678400	31	0.911	0.827	109	3.61E+10	36.078	0.043	1.300	0.968	34.930	
Junho	2.45E+07	21.06	2592000	30	0.919	0.827	109	3.49E+10	34.915	0.041	1.618	1.000	34.915	
Julho	2.55E+07	25.08	2678400	31	0.922	0.827	109	3.61E+10	36.078	0.039	1.690	1.000	36.078	
Agosto	2.27E+07	24.43	2678400	31	0.926	0.827	109	3.61E+10	36.078	0.039	1.508	1.000	36.078	
Setembro	1.72E+07	21.03	2592000	30	0.919	0.827	109	3.49E+10	34.915	0.041	1.135	0.881	30.760	
Outubro	1.08E+07	16.15	2678400	31	0.909	0.827	109	3.61E+10	36.078	0.044	0.706	0.609	21.987	
Novembro	7.11E+06	11.77	2592000	30	0.850	0.827	109	3.49E+10	34.915	0.046	0.433	0.399	13.924	
Dezembro	5.66E+06	9.07	2678400	31	0.878	0.827	109	3.61E+10	36.078	0.047	0.356	0.333	12.030	
Total									424.79				312.572	0.736

Tabela 17 - Dados calculados para obtenção das frações solares em Évora.

Meses	$I\beta$	T_a	Δt	N	Total	$(\tau\alpha)_n$	A_{abs}	Pger	Pger	X	Y	f	Q_{solar} mensal	Fração anual solar
	(J/(m ² .dia))	°C	s	dia	$\tau\alpha/(\tau\alpha)_n$		m ²	J	GJ				GJ	
Janeiro	7.61E+06	9.31	2678400	31	0.881	0.827	109	3.61E+10	36.078	0.047	0.481	0.437	15.775	
Fevereiro	1.07E+07	10.4	2419200	28	0.905	0.827	109	3.26E+10	32.587	0.047	0.696	0.602	19.619	
Março	1.53E+07	12.43	2678400	31	0.912	0.827	109	3.61E+10	36.078	0.046	1.001	0.803	28.976	
Abril	1.86E+07	13.5	2592000	30	0.919	0.827	109	3.49E+10	34.915	0.045	1.225	0.929	32.450	
Maiο	2.09E+07	16.19	2678400	31	0.914	0.827	109	3.61E+10	36.078	0.044	1.371	1.000	36.078	
Junho	2.43E+07	20.22	2592000	30	0.919	0.827	109	3.49E+10	34.915	0.042	1.603	1.000	34.915	
Julho	2.52E+07	23.29	2678400	31	0.922	0.827	109	3.61E+10	36.078	0.040	1.667	1.000	36.078	
Agosto	2.29E+07	23.36	2678400	31	0.926	0.827	109	3.61E+10	36.078	0.040	1.522	1.000	36.078	
Setembro	1.75E+07	21.4	2592000	30	0.919	0.827	109	3.49E+10	34.915	0.041	1.156	0.893	31.162	
Outubro	1.13E+07	17.05	2678400	31	0.909	0.827	109	3.61E+10	36.078	0.043	0.740	0.633	22.835	
Novembro	7.78E+06	13.01	2592000	30	0.850	0.827	109	3.49E+10	34.915	0.045	0.475	0.433	15.103	
Dezembro	6.23E+06	10.4	2678400	31	0.878	0.827	109	3.61E+10	36.078	0.047	0.392	0.364	13.144	
Total									424.79				322.214	0.759

Tabela 18 - Dados calculados para obtenção das frações solares em Faro.

Meses	$I\beta$	T_a	Δt	N	Total	$(\tau\alpha)_n$	A_{abs}	Pger	Pger	X	Y	f	$Q_{solar\ mensal}$	Fração anual solar
	(J/(m ² .dia))	°C	s	dia	$\tau\alpha/(\tau\alpha)_n$		m ²	J	GJ				GJ	
Janeiro	8.21E+06	11.84	2678400	31	0.881	0.827	109	3.61E+10	36.078	0.046	0.519	0.468	16.892	
Fevereiro	1.16E+07	12.69	2419200	28	0.907	0.827	109	3.26E+10	32.587	0.045	0.756	0.644	20.995	
Março	1.60E+07	14.17	2678400	31	0.913	0.827	109	3.61E+10	36.078	0.045	1.048	0.831	29.996	
Abril	1.95E+07	15.46	2592000	30	0.921	0.827	109	3.49E+10	34.915	0.044	1.289	0.962	33.602	
Maiο	2.17E+07	17.74	2678400	31	0.917	0.827	109	3.61E+10	36.078	0.043	1.430	1.000	36.078	
Junho	2.51E+07	20.97	2592000	30	0.921	0.827	109	3.49E+10	34.915	0.041	1.658	1.000	34.915	
Julho	2.60E+07	23.68	2678400	31	0.924	0.827	109	3.61E+10	36.078	0.040	1.725	1.000	36.078	
Agosto	2.36E+07	23.66	2678400	31	0.927	0.827	109	3.61E+10	36.078	0.040	1.570	1.000	36.078	
Setembro	1.85E+07	22.02	2592000	30	0.921	0.827	109	3.49E+10	34.915	0.041	1.223	0.929	32.433	
Outubro	1.23E+07	18.79	2678400	31	0.911	0.827	109	3.61E+10	36.078	0.042	0.802	0.676	24.389	
Novembro	8.58E+06	15.44	2592000	30	0.851	0.827	109	3.49E+10	34.915	0.044	0.523	0.472	16.470	
Dezembro	6.83E+06	13.21	2678400	31	0.879	0.827	109	3.61E+10	36.078	0.045	0.431	0.396	14.303	
Total									424.79				332.230	0.782

Tabela 19 - Dados calculados para obtenção das frações solares em Lisboa.

Meses	$I\beta$	T_a	Δt	N	Total	$(\tau\alpha)_n$	A_{abs}	Pger	Pger	X	Y	f	$Q_{solar\ mensal}$	Fração anual solar
	(J/(m2.dia))	°C	s	dia	$\tau\alpha/(\tau\alpha)_n$		m ²	J	GJ				GJ	
Janeiro	7.61E+06	11.32	2678400	31	0.881	0.827	109	3.61E+10	36.078	0.046	0.481	0.438	15.788	
Fevereiro	1.11E+07	12.6	2419200	28	0.907	0.827	109	3.26E+10	32.587	0.045	0.721	0.620	20.191	
Março	1.61E+07	14.33	2678400	31	0.914	0.827	109	3.61E+10	36.078	0.045	1.055	0.836	30.145	
Abril	2.06E+07	15.36	2592000	30	0.925	0.827	109	3.49E+10	34.915	0.044	1.368	1.000	34.915	
Maiο	2.27E+07	17.38	2678400	31	0.919	0.827	109	3.61E+10	36.078	0.043	1.500	1.000	36.078	
Junho	2.39E+07	20.38	2592000	30	0.918	0.827	109	3.49E+10	34.915	0.041	1.576	1.000	34.915	
Julho	2.44E+07	22.72	2678400	31	0.920	0.827	109	3.61E+10	36.078	0.040	1.613	1.000	36.078	
Agosto	2.29E+07	22.98	2678400	31	0.926	0.827	109	3.61E+10	36.078	0.040	1.520	1.000	36.078	
Setembro	1.84E+07	21.76	2592000	30	0.922	0.827	109	3.49E+10	34.915	0.041	1.216	0.925	32.299	
Outubro	1.26E+07	18.38	2678400	31	0.914	0.827	109	3.61E+10	36.078	0.042	0.827	0.693	25.004	
Novembro	8.21E+06	14.77	2592000	30	0.851	0.827	109	3.49E+10	34.915	0.044	0.501	0.454	15.842	
Dezembro	6.30E+06	12.37	2678400	31	0.879	0.827	109	3.61E+10	36.078	0.046	0.397	0.368	13.294	
Total									424.79				330.628	0.778

Tabela 20 - Dados calculados para obtenção das frações solares no Porto.

Meses	β	T_a	Δt	N	Total	$(\tau\alpha)_n$	A_{abs}	Pger	Pger	X	Y	f	$Q_{solar\ mensal}$	Fração anual solar
	(J/(m ² .dia))	°C	s	dia	$\tau\alpha/(\tau\alpha)_n$		m ²	J	GJ				GJ	
Janeiro	5.95E+06	9.3	2678400	31	0.877	0.827	109	3.61E+10	36.078	0.047	0.375	0.349	12.595	
Fevereiro	9.22E+06	10.38	2419200	28	0.902	0.827	109	3.26E+10	32.587	0.047	0.597	0.528	17.220	
Março	1.38E+07	11.96	2678400	31	0.909	0.827	109	3.61E+10	36.078	0.046	0.900	0.740	26.714	
Abril	1.84E+07	13.19	2592000	30	0.919	0.827	109	3.49E+10	34.915	0.045	1.213	0.923	32.231	
Mai	2.11E+07	15.24	2678400	31	0.915	0.827	109	3.61E+10	36.078	0.044	1.384	1.000	36.078	
Junho	2.32E+07	18.3	2592000	30	0.915	0.827	109	3.49E+10	34.915	0.043	1.523	1.000	34.915	
Julho	2.38E+07	20.27	2678400	31	0.918	0.827	109	3.61E+10	36.078	0.041	1.567	1.000	36.078	
Agosto	2.11E+07	20.12	2678400	31	0.922	0.827	109	3.61E+10	36.078	0.042	1.395	1.000	36.078	
Setembro	1.63E+07	18.95	2592000	30	0.917	0.827	109	3.49E+10	34.915	0.042	1.072	0.846	29.522	
Outubro	1.04E+07	15.96	2678400	31	0.909	0.827	109	3.61E+10	36.078	0.044	0.678	0.589	21.243	
Novembro	6.60E+06	12.6	2592000	30	0.849	0.827	109	3.49E+10	34.915	0.045	0.402	0.373	13.013	
Dezembro	4.94E+06	10.6	2678400	31	0.876	0.827	109	3.61E+10	36.078	0.047	0.310	0.293	10.587	
Total									424.79				306.275	0.721

Tabela 21 - Dados calculados para obtenção das frações solares em Viana do Castelo.

Meses	$I\beta$	T_a	Δt	N	Total	$(\tau\alpha)_n$	A_{abs}	Pger	Pger	X	Y	f	$Q_{solar\ mensal}$	Fração anual solar
	(J/(m2.dia))	°C	s	dia	$\tau\alpha/(\tau\alpha)_n$		m ²	J	GJ				GJ	
Janeiro	5.79E+06	9.53	2678400	31	0.878	0.827	109	3.90E+10	38.961	0.044	0.338	0.318	12.379	
Fevereiro	9.15E+06	10.53	2419200	28	0.904	0.827	109	3.52E+10	35.191	0.043	0.550	0.493	17.333	
Março	1.36E+07	12.06	2678400	31	0.911	0.827	109	3.90E+10	38.961	0.042	0.823	0.690	26.885	
Abril	1.83E+07	13.4	2592000	30	0.921	0.827	109	3.77E+10	37.704	0.042	1.117	0.871	32.834	
Mai	2.10E+07	15.44	2678400	31	0.916	0.827	109	3.90E+10	38.961	0.041	1.276	0.956	37.258	
Junho	2.33E+07	18.59	2592000	30	0.917	0.827	109	3.77E+10	37.704	0.039	1.418	1.000	37.704	
Julho	2.34E+07	20.58	2678400	31	0.919	0.827	109	3.90E+10	38.961	0.038	1.428	1.000	38.961	
Agosto	2.09E+07	20.29	2678400	31	0.924	0.827	109	3.90E+10	38.961	0.038	1.285	0.961	37.432	
Setembro	1.61E+07	18.88	2592000	30	0.919	0.827	109	3.77E+10	37.704	0.039	0.984	0.794	29.921	
Outubro	1.02E+07	15.75	2678400	31	0.910	0.827	109	3.90E+10	38.961	0.041	0.620	0.546	21.273	
Novembro	6.41E+06	12.49	2592000	30	0.850	0.827	109	3.77E+10	37.704	0.042	0.362	0.339	12.768	
Dezembro	4.77E+06	10.7	2678400	31	0.877	0.827	109	3.90E+10	38.961	0.043	0.278	0.265	10.316	
Total									458.74				315.064	0.687

6.3 Ficha técnica do painel solar

Gama	WarmSun	
Modelo	FKC-2S	
Certificados		
Montagem	Vertical	
Dimensões: A x L x P	mm	2017 x 1175 x 87
Área total	m ²	2,37
Área de abertura	m ²	2,25
Área do absorvedor	m ²	2,18
Volume do absorvedor	l	0,94
Peso em vazio	kg	40
Pressão de funcionamento admissível do coletor	bar	6
Caudal nominal	l/h	50
Estrutura	Fibra de vidro (SMC)	
Isolamento	Lã mineral, 55 mm espessura	
Absorvedor	Altamente seletivo	
Cobertura do absorvedor	PVD	
Circuito hidráulico	Grelha de tubos	
Curva de rendimento instantâneo segundo EN 12975-2 (baseada na área de abertura)		
Fator de eficiência (η)		0,766
Coefficiente de perdas linear (a_1)	W/(m ² K)	3,216
Coefficiente de perdas secundário (a_2)	W/(m ² K ²)	0,015

Figura 1 - Características técnicas do painel selecionado.