

UNIVERSIDADE DE LISBOA
FACULDADE DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOGRÁFICA, GEOFÍSICA E ENERGIA



Desempenho energético de bombas de calor e
sistemas solares térmicos considerando perfis de
extração normalizados

João Pedro Gonçalves David

Mestrado Integrado em Engenharia da Energia e do Ambiente

2014

UNIVERSIDADE DE LISBOA
FACULDADE DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOGRÁFICA, GEOFÍSICA E ENERGIA



Desempenho energético de bombas de calor e
sistemas solares térmicos considerando perfis de
extração normalizados

João Pedro Gonçalves David

Dissertação de Mestrado em Engenharia da Energia e do Ambiente

Trabalho realizado sob a supervisão de

Jorge Manuel Resende Vieira Facão (LNEG)

Maria João Petronilo de Carvalho (FCUL)

2014

Agradecimentos

Agradeço a todos os que contribuíram para a realização e conclusão desta tese de Mestrado, nomeadamente:

Aos meus orientadores, Dr. Jorge Facão e Dra. Maria João Carvalho, pela excelente orientação e por todo o apoio e disponibilidade demonstrados na resolução dos problemas que surgiram no decorrer deste trabalho;

Aos meus familiares que sempre me apoiaram, não só nesta fase final, mas durante todo o meu percurso académico;

Aos meus colegas e amigos por todo o seu incentivo.

Abstract

This study aims to compare the performance of solar thermal systems and heat pumps for domestic hot water preparation, considering the same extraction profiles. The analysis of solar systems was done in TRNSYS environment, while for the analysis of the heat pump was used the modified BIN method, present in the article “New test methodologies to analyse direct expansion solar assisted heat pumps for domestic hot water”. The comparison was done for thirty different cities, chosen from the Nomenclature of Territorial Units for Statistics (NUTS III). The performance was evaluated by parameters such as the solar fraction, the seasonal performance factor of the heat pump, the primary energy consumption and the life cycle cost during ten years.

With regard to solar fraction, values vary between 53.31% in Faro to 41.28% in Funchal, with a southern region providing the best results. The seasonal performance factor varies between 2.03 in Ponta Delgada and 1.78 in Bragança. Regarding primary energy consumption, the system that has a lower consumption is the solar thermal system with a gas backup system, then is the heat pump system and solar thermal system with electric backup presents the greatest consumption. Finally the economic analysis was done for the three systems, namely the life cycle cost of the systems during ten years, and as happened with primary energy consumption, the solar thermal system with a gas backup presents the lower value, followed by the heat pump system and the most expensive was the solar thermal system with electric support. This difference is mainly due to the discrepancy between the price of natural gas and electricity.

Keywords: Solar thermal system, heat pump, domestic hot water, solar fraction, seasonal performance factor

Resumo

Este trabalho tem como objetivo comparar o desempenho de sistemas solares térmicos e de bombas de calor para preparação de água quente sanitária, considerando os mesmos perfis de extração. Para o estudo dos sistemas solares efetuaram-se simulações numéricas em ambiente TRNSYS, enquanto para a análise da bomba de calor foi utilizado o método BIN modificado, presente no artigo "*New test methodologies to analyse direct expansion solar assisted heat pumps for domestic hot water*". A comparação foi feita para trinta cidades diferentes, escolhidas a partir da Nomenclatura das Unidades Territoriais para Fins Estatísticos (NUTS III). O desempenho foi avaliado através de parâmetros como a fração solar, o fator de desempenho sazonal da bomba de calor, o consumo de energia primária e os gastos com os sistemas utilizados ao fim de dez anos.

No que diz respeito à fração solar, os valores variam entre os 53.31% em Faro e os 41.28% no Funchal, sendo a região sul a que apresenta os melhores resultados. O fator de desempenho sazonal varia entre 2.03 em Ponta Delgada e 1.78 em Bragança. Quanto ao consumo de energia primária o sistema que apresenta um menor consumo é o sistema solar térmico com sistema de apoio a gás, de seguida encontra-se o sistema com bomba de calor e o sistema solar térmico com apoio elétrico é o que apresenta maior consumo. Por último efetuaram-se os cálculos económicos, mais concretamente, o cálculo do custo final dos sistemas ao fim de dez anos, e tal como sucedeu com o consumo de energia primária, o sistema solar térmico com sistema de apoio a gás é o mais barato, segue-se o sistema com bomba de calor e o mais dispendioso é o sistema solar térmico com apoio elétrico. Esta diferença deve-se principalmente à discrepância entre o preço do gás natural e da eletricidade.

Palavras-chave: Sistema solar térmico, bomba de calor, água quente sanitária, fração solar, fator de desempenho sazonal

Índice

Abstract	4
Keywords:	4
Resumo.....	5
Palavras-chave:.....	5
1. Introdução.....	1
1.1 Contextualização e estado da arte	1
1.2 Objetivo e estrutura do trabalho.....	4
2. Conceitos Teóricos.....	5
2.1 Sistemas Solares Térmicos.....	5
2.1.1 Sistemas de Circulação Forçada.....	6
2.1.2 Sistemas de Circulação Natural	7
2.2 Bombas de Calor	9
2.2.1 Bomba de calor de expansão direta assistida por energia solar	12
2.3 Simulação Dinâmica	14
2.3.1 Ambiente de trabalho na simulação dinâmica.....	14
2.4 Legislação Nacional e Europeia.....	16
2.4.1 Regulamento (EU) N.º 814/2013	16
2.4.2 Decreto-Lei n.º118/2013	19
2.4.3 Portaria n.º349-A/2013.....	19
2.4.4 Portaria n.º349-B/2013.....	19
2.4.5 Portaria n.º349-D/2013.....	20
2.4.6 Norma EN 16147:2011	22
2.4.7 Decisão da Comissão: 2013/114/EU.....	22
2.4.8 EN ISO 9806:2013	23
3. Caso de Estudo	25
3.1 Descrição do sistema solar térmico.....	25

3.1.1	Depósito	26
3.1.2	Coletor Solar	26
3.1.3	Bomba de circulação e circuito primário	27
3.1.4	Leitor de dados	27
3.1.5	Processador de dados de radiação	27
3.1.6	Tela de resultados.....	28
3.1.7	Resumo da Simulação	28
3.1.8	Controlador da Bomba	28
3.1.9	Perfil de carga.....	28
3.2	Bomba de calor.....	30
3.2.1	Método BIN modificado	32
3.3	Zonas climáticas e dados climáticos	33
4.	Apresentação e discussão dos resultados	35
4.1	Sistema solar térmico	35
4.2	Bomba de calor.....	40
4.3	Consumo de energia primária	42
4.4	Cálculos económicos.....	48
5.	Conclusões	54
6.	Referências	56
7.	Anexos.....	58
7.1	Tabelas com os valores do SPF diário para todas as cidades.....	58

Índice de figuras

Figura 1 – Consumo energético previsto para 2020.....	1
Figura 2 – Metas para 2020 na Europa para aquecimento e arrefecimento por fontes renováveis.	1
Figura 3 – Evolução da capacidade acumulada.	2
Figura 4 – Distribuição da capacidade instalada por setores.	2
Figura 5 – Divisão das vendas de bombas de calor na Europa em 2012: por tipo.....	3
Figura 6 – Venda de bombas de calor para água quente sanitária na Europa.....	3
Figura 7 – Esquema funcionamento de um sistema de circulação forçada.....	6
Figura 8 – Esquema funcionamento de um sistema solar termossifão.	7
Figura 9 – Esquema de funcionamento de um sistema de coletor e depósito integrado.....	8
Figura 10 – Esquema do sistema ICS com tubos de vácuo	8
Figura 11 – Representação esquemática e diagrama T-s do ciclo ideal de refrigeração por compressor de vapor.....	9
Figura 12 – Exemplo do esquema de representação gráfica de bombas de calor.	11
Figura 13 – Sistema de abreviação.....	12
Figura 14 – Bomba de calor com evaporador solar.	13
Figura 15 – Representação gráfica de uma bomba de calor assistida a energia solar.....	13
Figura 16 – Abreviatura para a bomba de calor assistida a energia solar.	14
Figura 17 – Sistema solar térmico na interface do Simulation Studio.....	15
Figura 18 – Diferentes parâmetros de um componente.....	15
Figura 19 – Ligações entre dois componentes do sistema solar térmico	16
Figura 20 – Sistema utilizado na simulação do sistema solar térmico.....	25
Figura 21 – Coletor Solar – evaporador da bomba de calor.	31
Figura 22 – Componentes do depósito com compressor.....	31
Figura 23: SPF diário como função da temperatura média diária do ar.....	32
Figura 24: Mapa de Portugal com as cidades escolhidas, de acordo com a NUTS III.	34
Figura 25: Radiação Incidente no plano inclinado.....	37
Figura 26: Energia fornecida pelo sistema solar térmico.....	38

Figura 27: Energia fornecida pelo sistema de apoio.	39
Figura 28: Fração Solar.....	40
Figura 29: Fator de desempenho sazonal (SPF).....	42
Figura 30: Consumo de energia primária do sistema solar térmico com apoio a gás.	44
Figura 31: Consumo de energia primária do sistema solar térmico com apoio elétrico.	45
Figura 32: Consumo de energia primária da bomba de calor.	46
Figura 33: Fator de desempenho sazonal necessário para igualar o consumo de energia primária do sistema solar térmico com apoio a gás.	48
Figura 34: Custo total do sistema solar térmico com apoio a gás.	51
Figura 35: Custo total do sistema solar térmico com sistema de apoio elétrico	52
Figura 36: Custo total do sistema com bomba de calor	53

Índice de tabelas

Tabela 1- Abreviaturas utilizadas para transferir informação do sistema para código.....	12
Tabela 2- Eficiência energética para os diferentes perfis de carga.....	18
Tabela 3- Requisitos de água misturada a 40 °C.....	18
Tabela 4- Eficiência energética para os diferentes perfis de carga.....	18
Tabela 5- Eficiência energética.....	18
Tabela 6- Rendimento nominal dos esquentadores.....	21
Tabela 7- Valores de eficiência de termoacumuladores em função de Q_{pr}	22
Tabela 8- Condições de teste para todos os sistemas.....	22
Tabela 9- Componentes e type.....	25
Tabela 10- Características do depósito.....	26
Tabela 11- Características do coletor solar.....	27
Tabela 12- Características do fluido que circula no circuito primário.....	27
Tabela 13- Perfil de carga do ciclo L.....	28
Tabela 14- Características do painel solar.....	30
Tabela 15 - Características do sistema.....	31
Tabela 16- NUTS III.....	33
Tabela 17- Valores da radiação solar incidente no plano inclinado, da energia fornecida pelo sistema solar térmico e sistema de apoio e da fração solar.....	35
Tabela 18- Consumo energia elétrica pelo compressor e SPF anual.....	41
Tabela 19- Consumo de energia primária.....	43
Tabela 20- SPF necessário para igualar consumo de energia primária.....	46
Tabela 21- Preços dos sistemas e do sistema de apoio.....	48
Tabela 22- Preço da eletricidade e do gás natural no ano 2014.....	49
Tabela 23- Deflator do PIB (%)......	49
Tabela 24- Custo total do sistema ao fim de 10 anos.....	50
Tabela 25- Viana do Castelo.....	58
Tabela 26- Bragança.....	58

Tabela 27- Braga	59
Tabela 28- Guimarães	60
Tabela 29- Porto	60
Tabela 30- Amarante	61
Tabela 31- Vila Real	62
Tabela 32- Santa Maria da Feira	62
Tabela 33- Aveiro.....	63
Tabela 34- Coimbra.....	64
Tabela 35- Guarda.....	64
Tabela 36- Castelo Branco	65
Tabela 37- Covilhã.....	66
Tabela 38- Seia.....	66
Tabela 39- Viseu	67
Tabela 40- Oliveira do Hospital.....	68
Tabela 41- Sertã	68
Tabela 42- Leiria.....	69
Tabela 43- Torres Vedras.....	70
Tabela 44- Tomar	70
Tabela 45- Santarém.....	71
Tabela 46- Lisboa.....	71
Tabela 47- Setúbal.....	72
Tabela 48- Portalegre	73
Tabela 49- Évora	74
Tabela 50- Grândola.....	74
Tabela 51- Beja	75
Tabela 52- Faro	76
Tabela 53- Ponta Delgada	76
Tabela 54- Funchal.....	77

Lista de Símbolos e Siglas

APA	Agência Portuguesa do Ambiente
AQS	Água Quente Sanitária
CC	Coeficiente de Conversão
COP	Coeficiente de Performance
C_p	Calor Específico da Água, em J/(kg.K)
DGEG	Direção Geral de Energia e Geologia
DL	Decreto – Lei
DX-SAHP	<i>Direct expansion solar assisted heat pump</i>
E	Energia diária total das extrações efetuadas, em kWh
EHPA	Associação Europeia das Bombas de Calor
EN	Norma Europeia
E_{RES}	Quantidade de energia renovável fornecida pelas tecnologias das bombas de calor, em kWh
EST	Energia Solar Térmica
ESTIF	Federação Europeia da Indústria Solar Térmica
EU	União Europeia
F_{sol}	Fração Solar
hj	Frequência de cada temperatura média diária
H_{HP}	Horas equivalentes de funcionamento a plena carga, em horas
ICS	Sistemas de Coletor e Depósito Integrado
ISO	Organização Internacional da Normalização
IVA	Imposto sobre o valor acrescentado
m	Caudal útil da água, kg/s
NUTS	Nomenclatura das Unidades Territoriais para Fins Estatísticos
PIB	Produto Interno Bruto
P_A	Preço do sistema de apoio a gás, em euros
P_{BC}	Preço da bomba de calor, em euros
P_E	Preço da eletricidade, em euros/kWh
P_G	Preço do gás natural, em euros/kWh
P_{rated}	Capacidade instalada das bombas de calor, tendo em conta o tempo de vida dos diferentes tipos de bombas de calor, em GW
P_{SS}	Preço do sistema solar térmico, em euros
Q	Energia, em Wh
Q_{aux}	Consumo anual de eletricidade auxiliar, em kWh
Q_{BC}	Energia térmica fornecida pela bomba de calor ao longo do ano, kWh
Q_C	Energia elétrica consumida pelo compressor, kWh

Q_{cor}	Fator de correção ambiente, em kWh
Q_{elec}	Consumo diário de eletricidade, em kWh
Q_{fuel}	Consumo diário de combustível, em kWh
Q_{nonsol}	Contribuição calorífica não solar anual, em kWh
Q_{ref}	Energia de referência, em kWh
Q_{SA}	Energia fornecida pelo sistema de apoio, kWh
Q_{SS}	Energia fornecida pelo sistema solar, kWh
Q_T	Energia total necessária para o consumo, kWh
Q_{tota}	Consumo anual de energia, em kWh
Q_{usable}	Total estimado do calor utilizável fornecido pelas bombas de calor, em GWh
RCCTE	Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios
RECS	Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços
REH	Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação
SCE	Sistema de Certificação Energética dos Edifícios
SCF	Fator de Controlo Inteligente
$SCOP_{net}$	Taxa de Eficiência Energética Sazonal
SHP	Bomba de Calor Solar
<i>Smart</i>	Conformidade do controlo inteligente
$SPER_{net}$	Taxa de Energia Primária Sazonal
SPF	Fator de Desempenho Sazonal
Δt	Intervalo de tempo, em horas
ΔT	Diferença de temperatura, em °C
η_{wh}	Eficiência energética do aquecimento de água
$\eta_{wh,nonsol}$	Eficiência energética do aquecimento de água do gerador de calor

1. Introdução

1.1 Contextualização e estado da arte

A crescente consciencialização de que é necessária uma redução no consumo de energia proveniente de fontes não renováveis, por motivos ambientais mas também económicos, tem conduzido ao desenvolvimento de novas tecnologias menos poluidoras. Assim, a aposta nas energias renováveis ajudará a reduzir o défice energético do país, garantindo também um aumento da sua segurança energética.

Para o ano 2020, segundo a Federação Europeia da Indústria Solar Térmica (ESTIF), estima-se que o consumo energético (procura final de energia) na Europa seja o seguinte:

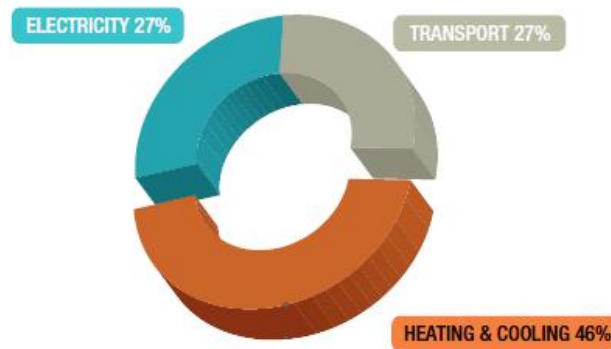


Figura 1 – Consumo energético previsto para 2020. (Fonte: ESTIF, 2014)

Como se observa o aquecimento e arrefecimento detêm uma fatia de quase 50% do consumo, sendo destes, 21% relativos a energia produzida a partir de fontes renováveis. Dentro das fontes renováveis, a distribuição de acordo com as diferentes tecnologias é apresentada na Figura 2:

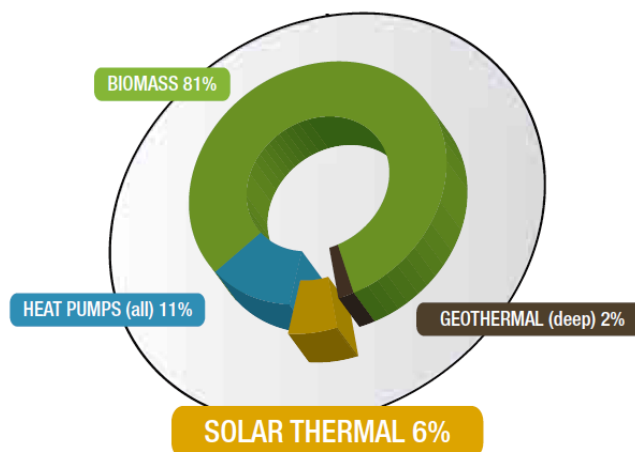


Figura 2 – Metas para 2020 na Europa para aquecimento e arrefecimento por fontes renováveis. (Fonte ESTIF, 2014)

De entre estas tecnologias o nosso foco irá para a energia solar térmica e para as bombas de calor. Ambas permitem a produção de água quente de um modo simples, eficiente e económico, fornecendo

assim, um contributo significativo na redução das emissões nacionais de gases de efeito de estufa, favorecendo o cumprimento das metas estipuladas no Protocolo de Quioto.

Portugal apresenta condições meteorológicas excepcionais para a utilização da energia solar térmica (EST), sendo a disponibilidade do recurso solar superior à média europeia. Na Figura 3 é apresentada a evolução da capacidade instalada no que respeita ao mercado do solar térmico.

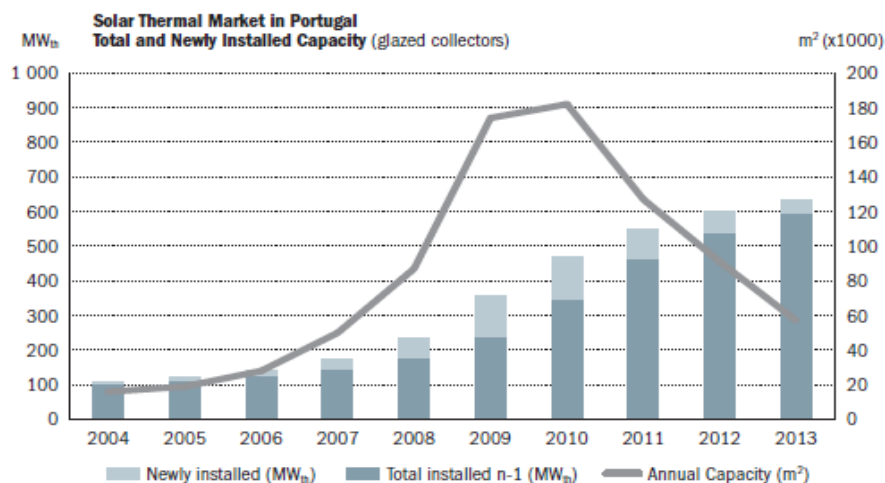


Figura 3 – Evolução da capacidade acumulada. (Fonte: ESTIF, 2014)

O forte crescimento da capacidade instalada a partir do ano 2006 deve-se em grande parte à obrigatoriedade (caso exista cobertura com exposição solar adequada) de instalar coletores solares térmicos para produção de Águas Quentes Sanitárias nos novos edifícios e nas reabilitações, definida no RCCTE – DL 80/2006 de 4 de Abril.

Como também se observa na Figura 3, nos últimos três anos assistiu-se a um fraco crescimento da capacidade total acumulada, devido à evolução das novas instalações que apresentam valores próximos do ano 2007. Comparando o ano 2012 com o ano 2013 a capacidade anual instalada diminuiu 36.8%, em parte devido à forte burocracia existente para o acesso ao Fundo de Eficiência Energética.

Os sistemas solares térmicos podem ser aplicados em diversos setores da sociedade, sendo a sua distribuição bastante diversificada, como se observa na Figura 4:

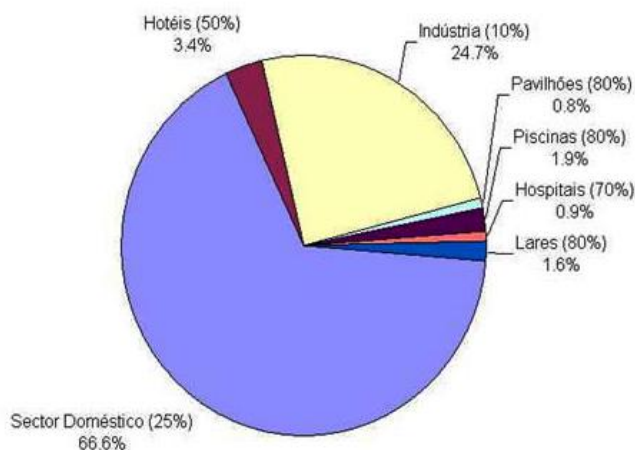


Figura 4 – Distribuição da capacidade instalada por setores. (Fonte: Mendes, 2011)

No sector doméstico, as principais aplicações da água quente são os duches e banhos de imersão e a lavagem de roupa e loiça. Para obter a água quente utilizam-se usualmente esquentadores e caldeiras a gás ou elétricos, sendo estes responsáveis por cerca de 50 % do consumo de energia neste sector, um valor que se reflete mensalmente nas faturas energética das famílias. Um passo simples para a redução desta fatura passa pelo uso de sistemas solares térmicos, que utilizam recursos endógenos, gratuitos e inesgotáveis. (Água Quente Solar, 2004)

Quanto às bombas de calor no ano 2012, segundo a Associação Europeia das Bombas de Calor (EHPA), as vendas dividiam-se pelos diferentes tipos de acordo com a Figura 5:

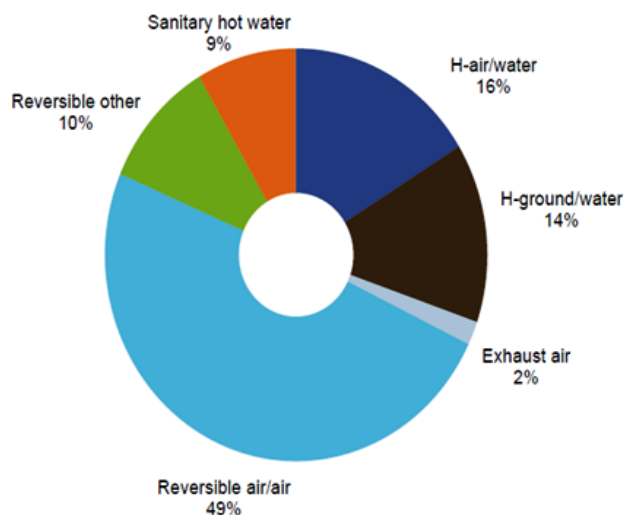


Figura 5 – Divisão das vendas de bombas de calor na Europa em 2012: por tipo. (Fonte: Jakobs, 2013)

Em termos de vendas de bombas de calor no mercado europeu, Portugal representa apenas a 18ª posição, tendo no ano 2012 experimentado um decréscimo nas vendas (cerca de menos 6000 unidades).

No que diz respeito às bombas de calor para águas quentes sanitárias, estas não representavam ainda uma grande parcela (9%), no entanto as suas vendas têm vindo a aumentar a um bom ritmo, como se observa seguidamente na Figura 6:

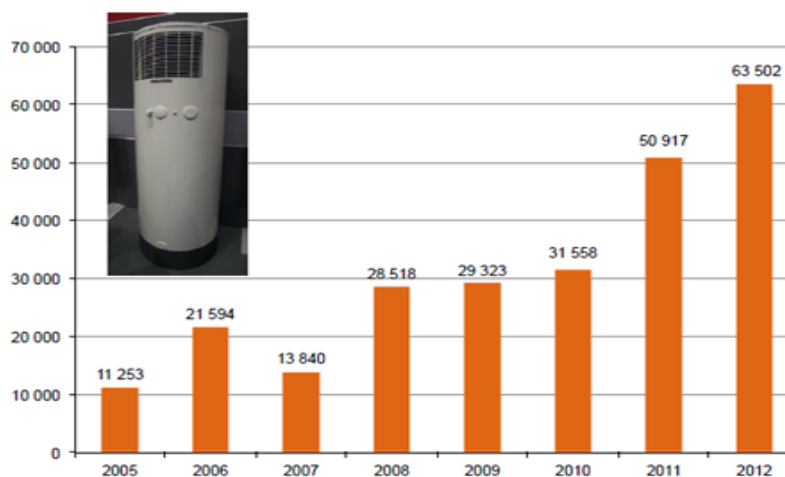


Figura 6 – Venda de bombas de calor para água quente sanitária na Europa. (Adaptado de: Jakobs, 2013)

1.2 Objetivo e estrutura do trabalho

Este trabalho tem como objetivo comparar o desempenho de sistemas solares térmicos com bombas de calor para preparação de água quente sanitária considerando perfis de extração de acordo com a diretiva de conceção ecológica. O desempenho será avaliado através da comparação da energia primária consumida em ambos os sistemas. Com este fim, para o estudo do sistema solar térmico serão efetuadas simulações numéricas em ambiente TRNSYS, implementando os perfis de extração, enquanto para análise da bomba de calor será utilizado o método BIN modificado.

No capítulo 2 é efetuada a caracterização dos diferentes sistemas solares térmicos e bombas de calor e explicado o funcionamento de ambos. É ainda explicado o funcionamento do programa TRNSYS e são descritas algumas das principais normas europeias que abrangem o tema deste trabalho.

A descrição do caso de estudo encontra-se no capítulo 3, onde se encontram pormenorizados os diferentes passos efetuados durante a realização do trabalho.

No capítulo 4 são apresentados e discutidos os resultados obtidos no trabalho.

Para o capítulo 5 estão reservadas as principais conclusões a retirar do trabalho desenvolvido.

2. Conceitos Teóricos

2.1 Sistemas Solares Térmicos

O princípio de funcionamento de um sistema solar térmico pode ser resumido do seguinte modo: a radiação solar incide no coletor, transfere-se sob a forma de calor para o fluido que circula no interior do coletor, sendo o calor posteriormente transferido para a água de consumo.

Os principais componentes de um sistema deste género são:

- **Coletor solar**

Tem a função de transformar a radiação solar incidente em energia térmica, através do aquecimento do fluido de transferência térmica que circula no seu interior.

- **Depósito de armazenamento**

Armazena a água quente até que esta seja utilizada para consumo.

- **Permutador de calor**

Transfere a energia térmica captada pelos coletores para a água de consumo. Pode ser do tipo serpentina, do tipo camisa, de placas ou de feixe tubular. Deve estar colocado na parte inferior do depósito, pois é aqui que se encontra a água mais fria (mais densa), permitindo assim uma melhor transferência energética (maior diferença de temperatura).

- **Circuito hidráulico**

É composto pelas tubagens, bombas de circulação, válvulas e outros elementos.

- **Mecanismos de controlo e regulação**

Componentes mecânicos e eletromecânicos que permitem o correto funcionamento do sistema.

- **Sistema de apoio**

São necessários para fazer face a situações de menor radiação, sendo normalmente composto por esquentadores, caldeiras, termoacumuladores ou uma resistência elétrica. É necessário ter em atenção que deve ser sempre dada prioridade à energia proveniente do sol.

Os sistemas solares térmicos são compostos por um **circuito primário** e por um **circuito secundário**. O circuito primário é um circuito fechado que liga vários elementos do sistema e onde se encontra o fluido térmico que é aquecido nos coletores. Este circuito permite a transferência de energia para a água armazenada. O circuito secundário corresponde ao circuito que fornece a água de consumo da rede para o depósito e assegura o fornecimento da água do depósito para o consumo.

Podem ser classificados em **diretos** ou **indiretos** dependendo do modo como é transferido o calor entre a área de captação e o depósito.

Nos sistemas diretos o fluido que circula nos coletores solares é a água de consumo. Este modo de transferência de calor é a solução mais eficiente e económica. No entanto apresenta diversos condicionantes, como a congelação da água nos coletores que pode levar à destruição de componentes, aparecimento de incrustações calcárias nas tubagens diminuindo a eficiência do sistema, o aumento do risco de corrosão e a necessidade de existir uma válvula para reduzir a pressão, caso a pressão da água da rede seja superior à pressão suportada pelo sistema. Os sistemas diretos não são usados para água de consumo humano, apenas para aplicações de aquecimento ambiente, processos industriais ou aquecimento de piscinas.

Nos sistemas indiretos o fluido que circula nos coletores através de um circuito fechado é um fluido térmico (água misturada com anticongelante), e existe transferência de calor para o circuito de consumo (secundário) através de um permutador interno ou externo ao depósito. Este fluido deve

apresentar diversas características que promovam uma eficiente transferência de calor, entre elas, um elevado calor específico, baixa viscosidade, alta estabilidade térmica e uma baixa temperatura de congelação.

Os sistemas para aquecimento de água a baixas temperaturas (inferior a 100 °C) podem ainda ser divididos tendo em conta a circulação do fluido térmico no circuito primário, em **circulação forçada** ou **circulação natural**.

No caso da circulação forçada é utilizada uma bomba de circulação para vencer as perdas de carga do circuito.

Na circulação natural ou termossifão a circulação do fluido térmico realiza-se tendo por base a diferença de densidades. O depósito encontra-se colocado acima dos coletores.

Existem diversas aplicações para sistemas de baixa temperatura:

- Aquecimento de água para uso doméstico;
- Aquecimento de água de piscinas;
- Aquecimento de água para fins industriais.

2.1.1 Sistemas de Circulação Forçada

Estes sistemas são caracterizados pela existência de uma bomba de circulação com o objetivo de forçar a circulação do fluido térmico nos coletores. Esta bomba é acionada por uma unidade de controlo diferencial que reage à diferença de temperatura entre a água à saída dos coletores e a temperatura da água na parte inferior do depósito (aproximadamente 7 °C), permitindo aquecer a água contida no depósito. Devido à existência da bomba o depósito pode ser colocado longe dos coletores solares, por exemplo no interior da habitação, contribuindo assim para a existência de menos perdas energéticas.

Na Figura 7 é apresentado o esquema de funcionamento de um sistema de circulação forçada.

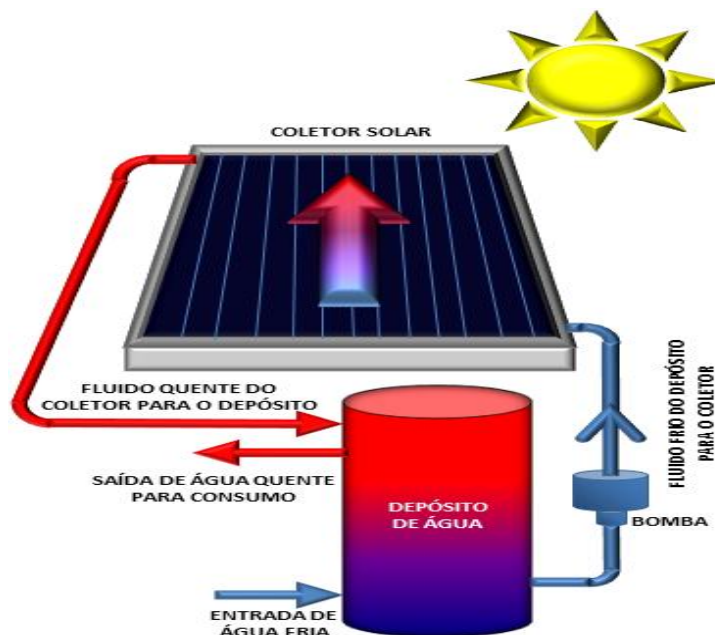


Figura 7 – Esquema funcionamento de um sistema de circulação forçada. (Fonte: Elergone, 2014)

Este é o tipo de sistema apropriado para médias e grandes instalações, devido à maior flexibilidade na instalação do circuito primário. É ainda possível a regulação do caudal.

Devido à sua maior complexidade estes sistemas apresentam maiores custos iniciais de instalação e consequentemente maiores riscos de fiabilidade. Com a utilização da bomba de circulação aparecem os consumos eléctricos associados e consequentemente a necessidade da presença de uma fonte de energia eléctrica. A colocação do depósito no interior assim como de outros dispositivos necessários a este sistema pode ainda levantar alguns problemas.

2.1.2 Sistemas de Circulação Natural

Nestes sistemas a circulação faz-se por convecção natural, provocada pela diferença de densidade. Estes podem ser divididos em sistemas termossifão e em sistemas de coletor e depósito integrados.

- **Sistemas Termossifão**

Durante o dia devido à radiação solar o fluido presente no coletor aquece (torna-se menos denso) deslocando-se para a parte superior do circuito (depósito). Aí existe permuta de calor com a água contida no depósito. Devido à permuta o fluido arrefece (torna-se mais denso) e desloca-se para a parte mais baixa do circuito (entrada do coletor). Desde que exista radiação solar este ciclo realiza-se sempre, sendo a água a utilizar retirada da parte superior do depósito.

No entanto durante a noite pode ocorrer circulação inversa, passando o fluido quente do depósito para os coletores. Para evitar este fenómeno é necessária a colocação de uma válvula anti retorno ou a manutenção de uma diferença de perto de 30 cm entre o topo do coletor e o fundo do depósito. O esquema de funcionamento deste sistema encontra-se na Figura 8:

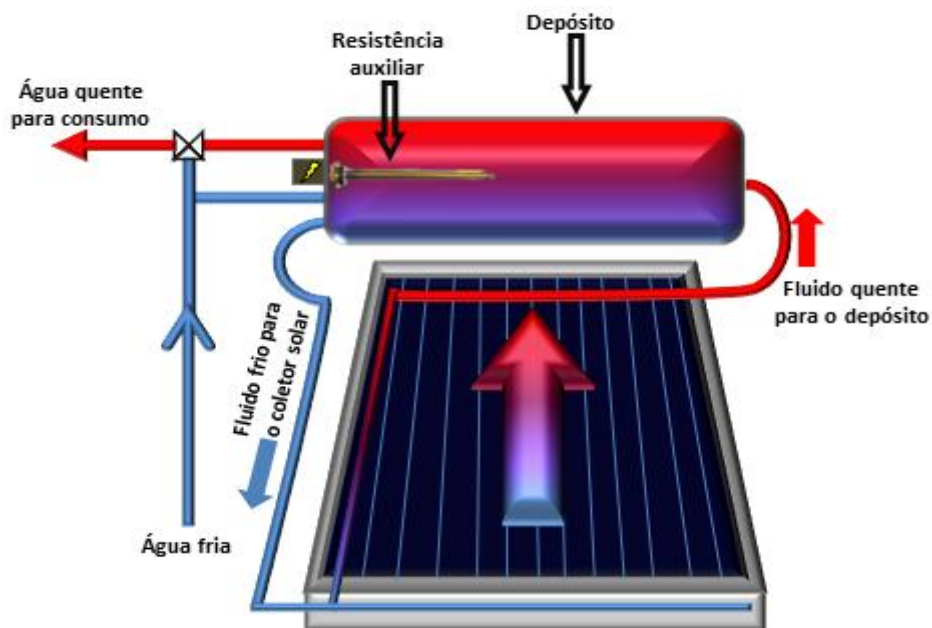


Figura 8 – Esquema funcionamento de um sistema solar termossifão. (Fonte: Elergone, 2014)

Estes sistemas têm como benefício a sua maior simplicidade e consequentemente menores custos, não apresentam riscos de fiabilidade, devido ao facto da circulação ser autorregulada não têm consumos associados e têm um maior tempo de vida comparativamente aos sistemas de circulação forçada.

No entanto como o caudal é regulado pela radiação, em dias de nebulosidade estes sistemas podem ficar inativos. Devido à presença do depósito no exterior e acima dos coletores apresentam alguns problemas estéticos e em países em que os Invernos são mais rigorosos existem grandes perdas térmicas para o meio ambiente e existe o risco de congelamento da água do circuito secundário.

- *Sistemas de coletor e depósito integrado (ICS)*

Estes sistemas destacam-se pelo facto de o depósito estar diretamente integrado no coletor solar, sendo a circulação do fluido térmico realizada através do fenómeno de circulação natural, como é apresentado na Figura 9:

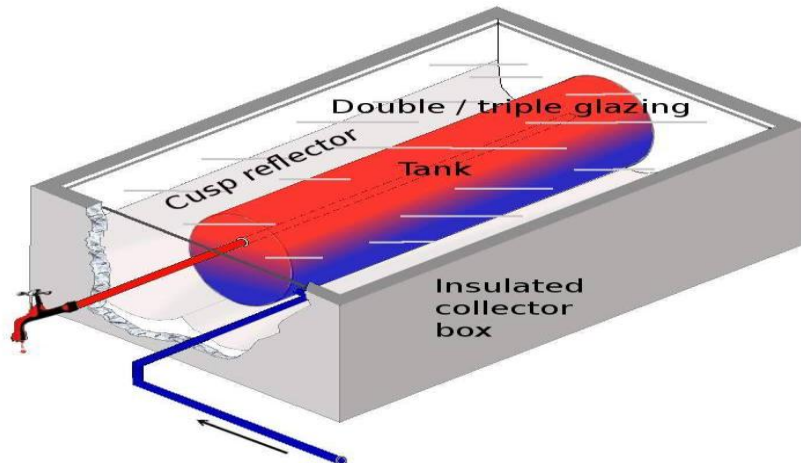


Figura 9 – Esquema de funcionamento de um sistema de coletor e depósito integrado. (Fonte: Wikimedia, 2010)

Uma das vantagens destes sistemas deve-se ao facto destes elementos estarem integrados, apresentando vantagens estéticas quando comparados com os sistemas termossifão. Outro dos aspetos positivos são as menores perdas térmicas durante a transferência do fluido térmico, dada a proximidade entre o depósito e o coletor.

Apesar destes aspetos positivos, como a face do depósito que está virada para o sol apresenta um fraco isolamento térmico, durante a noite e em dias mais frios ocorrem maiores perdas térmicas. Assim são apenas aconselhados para climas moderados.

Neste momento existem já outros sistemas ICS, que através de novas tecnologias procuram evitar estas perdas devidas ao isolamento térmico. Uma dessas tecnologias são os sistemas ICS com tubos de vácuo, que são formados por um coletor solar de tubos de vácuo que está acoplado ao depósito de armazenamento. Uma vez que são os tubos de vácuo que absorvem a radiação e a transformam em energia térmica, o depósito pode ser convenientemente isolado, diminuindo deste modo as perdas térmicas.

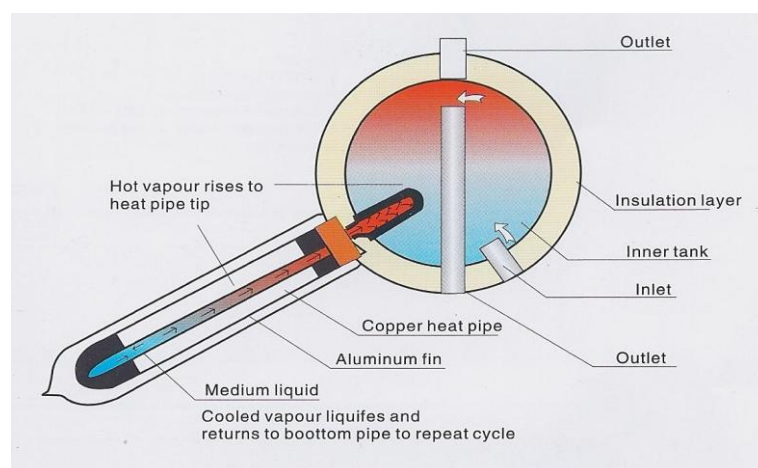


Figura 10 – Esquema do sistema ICS com tubos de vácuo (Fonte: Gorbiproducts, s.d.)

2.2 Bombas de Calor

As bombas de calor são máquinas térmicas de alta eficiência. O seu princípio de funcionamento tem sido desenvolvido desde meados do século XIX, centrando-se na estrutura do ciclo, nos fluidos de trabalho e na análise económica.

Através das bombas de calor é possível transferir calor a partir de uma fonte fria, utilizando uma quantidade relativamente pequena de energia. Tendo em atenção o ciclo termodinâmico, podem ser classificadas em dois grupos: bombas de calor de compressão de vapor e bombas de calor de absorção. No primeiro caso é utilizado um motor elétrico ou de combustão para acionar o compressor no ciclo de compressão de vapor. No segundo caso a única função do trabalho mecânico é acionar uma pequena bomba hidráulica.

O ciclo de refrigeração por compressão de vapor tem quatro componentes principais: um compressor, um condensador, uma válvula de expansão e um evaporador.

O seu funcionamento pode ser observado na Figura 11 e resume-se do seguinte modo: o fluido frigorigéneo entra no compressor na forma de vapor saturado e é comprimido de modo isentrópico até à pressão do condensador. O vapor deixa o compressor com uma temperatura relativamente alta e arrefece e condensa à medida que escoo pelo condensador, rejeitando calor para o meio circundante. Depois, o fluido frigorigéneo entra na válvula de expansão ou tubo capilar, onde a sua pressão e temperatura baixam drasticamente devido ao efeito de estrangulamento. De seguida, o fluido frigorigéneo a baixa temperatura entra no evaporador, evaporando-se ao retirar calor do espaço refrigerado. O ciclo chega ao fim com o fluido frigorigéneo a deixar o evaporador e a voltar a entrar no compressor. (ÇENGEL, 2006)

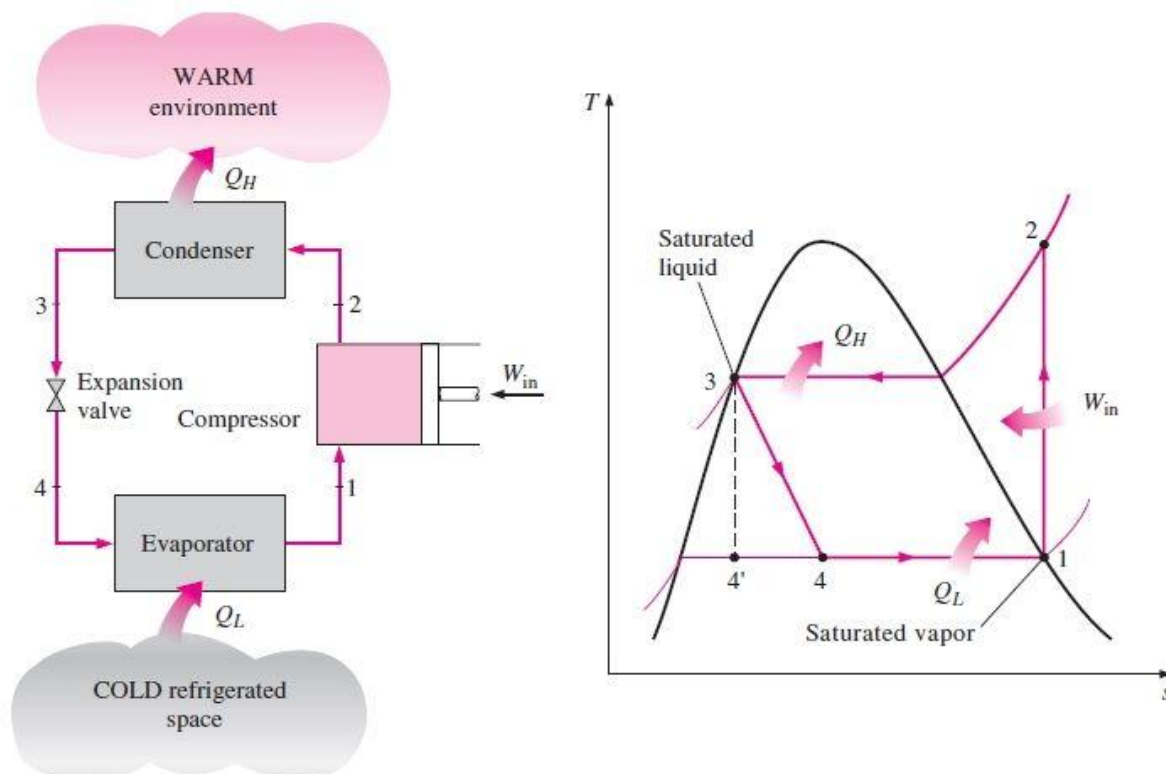


Figura 11 – Representação esquemática e diagrama T-s do ciclo ideal de refrigeração por compressor de vapor. (Fonte: ÇENGEL, 2006)

O comportamento térmico das bombas de calor é avaliado através de diversos parâmetros, entre eles:

- **Coefficiente de performance (COP)**, que expressa a eficiência de uma bomba de calor e que corresponde à relação entre o calor transferido (Q_Q) e o trabalho aplicado ($W_{liq,e}$).

$$COP = \frac{Q_Q}{W_{liq,e}} \quad (1)$$

As bombas de calor de compressão a ar podem apresentar COPs entre os 2-4, por sua vez as bombas de calor geotérmicas apresentam COPs entre os 3-5. O COP é um parâmetro bastante influenciável pela temperatura das fontes, pelo que se a fonte fria baixar, o COP baixa significativamente. Deste modo as bombas de calor que utilizam como fonte fria o solo ou a água apresentam um COP mais estável.

No caso das bombas de calor a ar, em dias mais frios onde a bomba de calor não é capaz de proporcionar a energia térmica suficiente, é necessário utilizar resistências elétricas adicionais, o que provoca uma diminuição do COP médio. (Facão, 2010)

- **Fator de desempenho sazonal (SPF)**, que nos fornece a eficiência energética final de todo o sistema ou de um subsistema definido. Este é igual à energia útil produzida sobre a energia total de entrada, como demonstra a equação 2:

$$SPF = \frac{\int (Q_{SH} + Q_{DHW} + Q_C) \cdot dt}{\int \sum P_{el} \cdot dt} \quad (2)$$

Onde ($Q_{SH} + Q_{DHW}$) é a energia calorífica útil fornecida pelo sistema, Q_C é a energia útil de arrefecimento removida do sistema circundante e P_{el} a potência elétrica consumida.

Para um cálculo anual deste parâmetro, é apresentada pela norma EN 15316-4-2 [20] um método para as necessidades energéticas anuais duma bomba de calor, quer para preparação de AQS, quer para climatização, tendo em atenção as variações anuais do clima e o ensaio experimental da bomba de calor (COP) para condições nominais definidas. Este é um método baseado no método BIN, que será aprofundado no desenvolvimento deste trabalho. (Malenković, *et al.*, 2012)

- **Rácio de energia primária (PER)** é definido como a quantidade de energia primária utilizada para a produção de energia útil por parte do sistema. Este pode ser calculado utilizando o COP, multiplicando-o pelo rendimento da conversão da energia primária (η) em trabalho para acionar o compressor ou uma bomba. (Facão, 2010)

$$PER = \eta * COP \quad (3)$$

- **Taxa de eficiência energética sazonal (SCOP)**, este é um parâmetro que tem em conta o funcionamento da máquina a carga parcial. Ao invés do COP que se define como uma razão entre potências (W/W), a SCOP é uma razão entre energias (Wh/Wh) e representa o comportamento da máquina durante um qualquer intervalo de tempo. (Facão, 2010)

As bombas de calor podem ainda ser divididas de acordo com as fontes de calor fria e quente, podendo assim serem utilizadas diversas combinações:

- Ar – ar;
- Ar – água;
- Água – ar;
- Água – água;

- Solo – ar;
- Solo – água.

Por norma o fluido que transfere a energia térmica para o local a climatizar é a água ou o ar.

No início de 2010, através do Programa *Solar Heating and Cooling* da Agência Internacional de Energia, começaram a ser analisados sistemas combinados de energia solar térmica e bombas de calor. No artigo *Systematic Classification of Combined Solar Thermal and Heat Pumps Systems* foi proposto um sistema de classificação para as bombas de calor, permitindo por um lado obter uma visão geral das alternativas existentes e por outro proporcionar uma base de comparação entre as vantagens e desvantagens do ponto de vista técnico. (Elimar, et al., 2007)

Nesta representação o sistema de aquecimento é apresentado sobre um fundo branco, onde se encontram os sistemas de armazenamento (objetos azuis), os componentes de conversão de energia (objetos laranjas). A análise de diversos sistemas de bombas de calor assistidos por energia solar permitiu concluir que existem cinco componentes essenciais, o coletor, a bomba de calor e o aquecedor auxiliar, complementados por sistemas de armazenamento, um no lado da fonte fria e outro no lado da fonte quente da bomba de calor. Estes componentes encontram-se todos em posições definidas. As fronteiras (fundo cinzento), as fontes de energia de origem ambiental (objetos verdes) encontram-se na parte superior, a energia que poderá ser utilizada (objetos a cinzento escuro). A energia útil como é o caso da água quente sanitária ou aquecimento de espaços apresenta-se à direita (objetos vermelhos).

O último passo é a representação dos fluxos de energia entre os diversos componentes do sistema. Ao apresentar estes fluxos, a figura torna-se um gráfico quantitativo dos fluxos de energia, existindo para tal diversos tipos de linha, representando cada um o meio transmissor da energia.

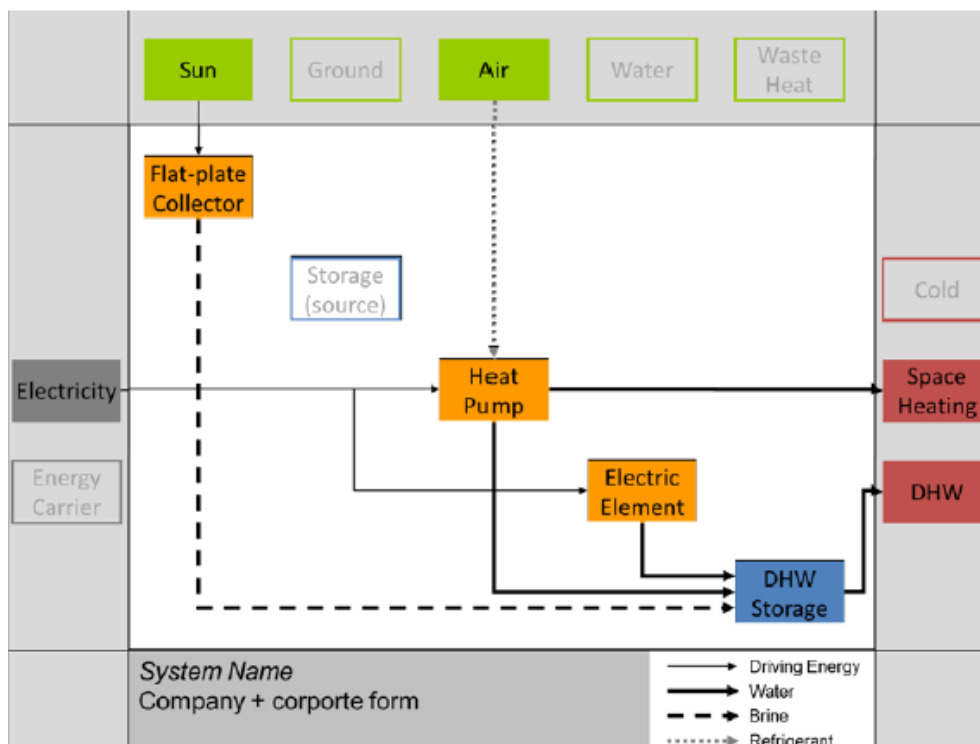


Figura 12 – Exemplo do esquema de representação gráfica de bombas de calor. (Fonte: Elimar, et al., 2007)

Pode ainda ser usado um sistema de abreviação para transmitir informação sobre o sistema, como exemplificado na Figura 13. Convencionou-se deste modo que as fontes de calor frias e as fontes de calor quentes do coletor solar (S) e das bombas de calor (HP) estão indicadas com sobrescritos (fonte fria) e subscritos (fonte quente) em torno da abreviatura SHP (bomba de calor solar).

sources **SHP** *sources*
sinks **SHP** *sinks*

Figura 13 – Sistema de abreviação. (Fonte: Elimar, et al., 2007)

Na Tabela 1 são apresentadas as diferentes abreviaturas que podem ser utilizadas para descrever os sistemas:

Tabela 1- Abreviaturas utilizadas para transferir informação do sistema para código.
(Adaptado de: Elimar, *et al.*, 2007)

S : coletor solar	Air : ar	srS : armazenamento do lado da fonte fria
HP : bomba de calor	G : solo	skS : armazenamento do lado da fonte quente
Sol : Irradiação solar	W : água subterrânea	SH : aquecimento de espaços (diretamente)

2.2.1 Bomba de calor de expansão direta assistida por energia solar

A bomba de calor de expansão direta assistida por energia solar (DX-SAHP: direct expansion solar assisted heat pump) utilizada na preparação de água quente sanitária, usa como fonte fria o ar exterior, apesar de o evaporador estar exposto à radiação solar, o que leva a um aumento da temperatura durante períodos de forte radiação. No período noturno estes sistemas são penalizados devido às trocas energéticas do evaporador com o ar ambiente.

Este sistema é composto pelos seguintes componentes:

- Painel Solar Termodinâmico sem vidro;
- Depósito termoacumulador;
- Termobloco (inclui compressor elétrico);
- Válvula de expansão termostática;
- Sistema de aquecimento auxiliar;
- Controlador

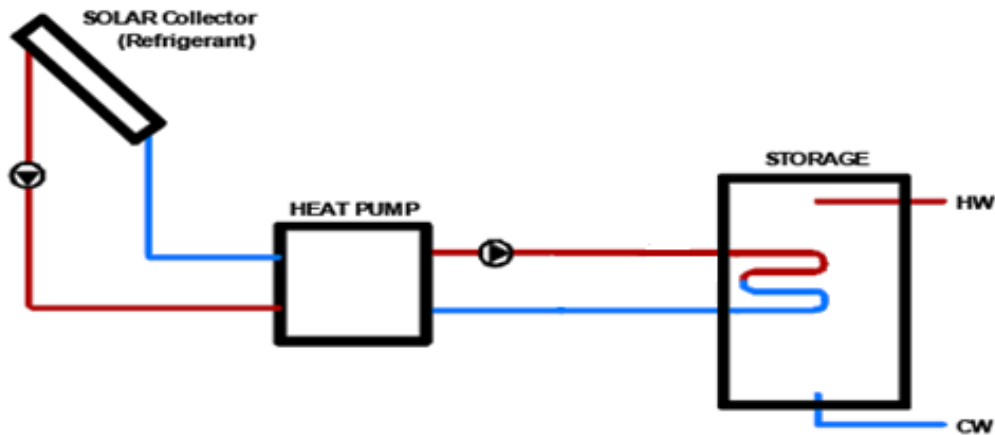


Figura 14 – Bomba de calor com evaporador solar. (Fonte: Facão, 2010)

No interior do coletor solar termodinâmico circula o líquido frigorígeno da bomba de calor, que funciona como fluido para transferência de calor. O coletor solar absorve a energia proveniente da radiação solar para evaporar o líquido frigorígeno. Tal é possível pois este circula através do coletor, recebendo assim energia das regiões adjacentes até evaporar. De seguida entra para o compressor onde é aumentada a pressão. No condensador, que está integrado como um permutador de calor imerso na parte inferior do depósito, o vapor condensa transferindo o calor latente para a água armazenada no depósito. Posteriormente a pressão do fluido é diminuída através de uma válvula de expansão termostática e regressa ao coletor solar. Para os casos em que não é possível atingir a temperatura desejada através do procedimento anterior, é utilizado um sistema de aquecimento elétrico que está colocado na parte inferior do depósito à mesma altura do permutador de calor. Este sistema é controlado por um termostato existente no interior do depósito.

A representação de uma bomba de calor assistida a energia solar, utilizando o esquema utilizado na Figura 12, é apresentado na Figura 15:

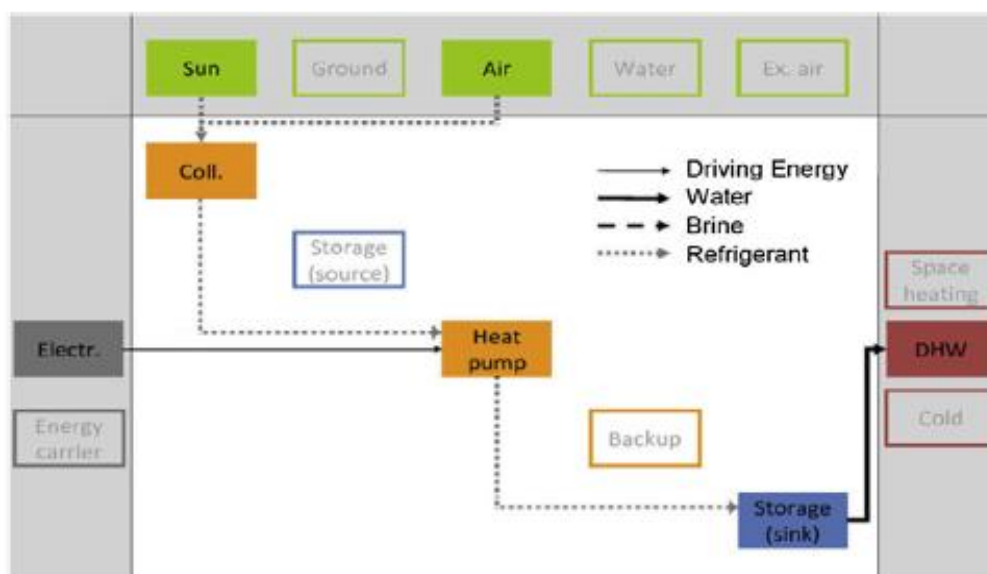


Figura 15 – Representação gráfica de uma bomba de calor assistida a energia solar. (Fonte: Facão and Carvalho, 2013)

Um sistema com estas características utiliza como fontes de energia ambiental a energia solar e o ar ambiente (objetos a verde). A energia que tem de ser adquirida é a eletricidade (objeto a cinzento escuro). Os componentes para a conversão da energia utilizados são o coletor solar e a bomba de calor (objetos laranjas). É utilizado um sistema de armazenamento do lado da fonte quente (objeto a azul) e como energia útil temos a água quente sanitária (objetos a vermelho).

Na Figura 16 é apresentada a abreviatura utilizada para representar o mesmo sistema:

A abreviatura é composta por 'Sol, Air' no topo, 'HP' no meio e 'SHP' no fundo. Um 'S' está no canto superior direito e 'skS' está no canto inferior direito.

Figura 16 – Abreviatura para a bomba de calor assistida a energia solar. (Fonte: Facão and Carvalho, 2013)

2.3 Simulação Dinâmica

TRNSYS ou Transient System Simulation é um programa para simulação energética de sistemas transitórios, desenvolvido pelo Laboratório de Energia Solar da Universidade de *Wisconsin, Madison* dos Estados Unidos da América. (Aiguasol, 2008)

O Laboratório Nacional de Energia e Geologia (LNEG) possui a licença para utilização da versão 16.01.0003 do TRNSYS. Este *software* é composto por três programas: o TRNBuild para introdução de dados específicos para edifícios, o TRNSYS Simulation Studio onde se cria sistemas com os seus componentes e ligações e por último pelo TRNEdit onde se pode criar ou modificar componentes. Neste projeto apenas foi utilizado o TRNSYS Simulation Studio com o objetivo de simular um Sistema Solar Térmico.

No que toca aos Sistemas Solares Térmicos, o TRNSYS é considerada a ferramenta de referência para a Agência Internacional de Energia. (Aiguasol, 2008)

Neste *software* o tempo é uma variável sempre presente durante as simulações. Cada sistema é composto por um conjunto de componentes (*Types*), que representam individualmente uma estrutura física ou uma operação. Para se conseguir cumprir uma missão específica estes componentes são todos interligados (*Connections*). Cada componente apresenta um conjunto pré-definido de dados como os *Parameters* (variáveis independentes do tempo) e *Inputs* (variáveis dependentes do tempo) que depois de processados proporcionam variáveis designadas como *Outputs*.

2.3.1 Ambiente de trabalho na simulação dinâmica

O *Simulation Studio* é o programa do TRNSYS em que são projetados e simulados os sistemas a estudar. Na Figura 17 é apresentada a interface do programa em que está esquematizado um sistema solar térmico:

Para finalizar os diversos componentes são ligados uns aos outros através de *connections*, onde os dados de saída de um componente passam a corresponder aos dados de entrada de outro componente, como exemplificado na Figura 19.

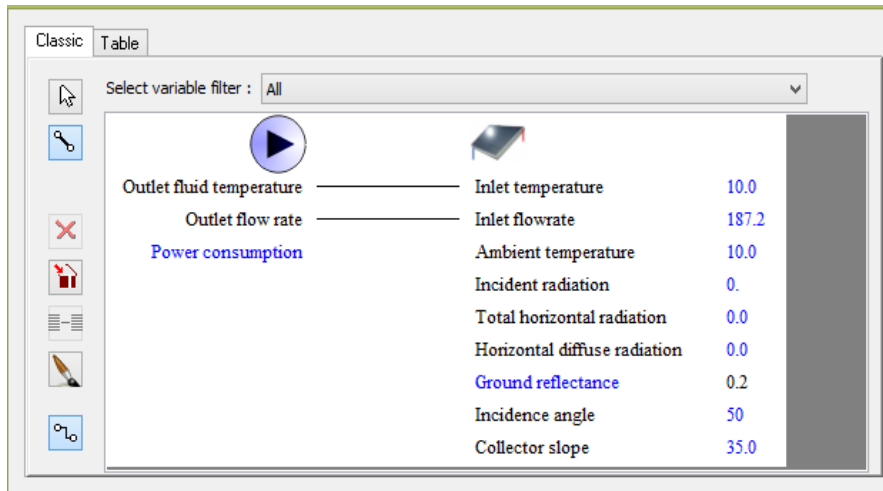


Figura 19 – Ligações entre dois componentes do sistema solar térmico

Resumindo, a simulação do comportamento de um sistema resulta da simulação do comportamento dos componentes individuais.

2.4 Legislação Nacional e Europeia

Atualmente a energia tem um papel fulcral para a sociedade, sendo por isso necessário o controlo das atividades do setor energético. Com esse fim determinaram-se diversas políticas na área energética e ambiental.

Para que exista uma estratégia apropriada é essencial encontrar o ponto de equilíbrio entre as questões ambientais e a sua viabilidade técnico – económica, procurando sempre a obtenção de um desenvolvimento sustentável e a competitividade entre diferentes tecnologias. Torna-se assim fundamental o aumento da eficiência energética do país, a fim de diminuir a dependência energética do exterior. (DGEG, 2014)

De seguida é apresentada a legislação que diz respeito às temáticas abordadas por este trabalho, com origem europeia ou nacional.

2.4.1 Regulamento (EU) N.º 814/2013

Este regulamento dá execução à Diretiva 2009/125/CE do Parlamento Europeu e do Conselho no que respeita aos requisitos de conceção ecológica aplicáveis aos aquecedores de água e reservatórios de água quente.

Este regulamento define os requisitos de conceção ecológica para a colocação no mercado e/ou entrada em serviço de aquecedores de água com uma produção térmica nominal igual ou inferior a 400 kW, e de reservatórios de água quente com um volume útil igual ou inferior a 2000 litros, incluindo os integrados em sistemas mistos de aquecedor de água e dispositivo solar definidos no artigo 2.º do Regulamento Delegado (EU) n.º812/2013.

São ainda apresentadas algumas definições relevantes para o desenvolvimento deste trabalho, entre elas:

- **Aquecedor de água**

É um dispositivo que está conectado a uma fonte de alimentação externa de água potável ou para uso sanitário. Este produz e transfere calor a fim de produzir água quente potável ou para uso sanitário, com diferentes níveis de temperatura, quantidades e caudais durante diferentes intervalos de tempo, estando equipado com um ou mais geradores de calor.

- **Volume útil de armazenagem**

É o volume nominal de um reservatório de água quente ou de um termoacumulador, em litros.

- **Aquecedor de água tradicional**

É um aquecedor de água que produz calor utilizando a queima de combustíveis fósseis e/ou de biomassa e do efeito de joule em elementos de aquecimento por resistência elétrica.

- **Aquecedor de água com bomba de calor**

Aquecedor que aproveita calor ambiente a partir de uma fonte atmosférica, aquática ou geotérmica e/ou calor residual para a geração de calor.

- **Aquecedor de água solar**

Está equipado com um ou mais coletores solares, reservatórios de água quente solar, geradores de calor e eventualmente bombas de calor no circuito de coletores e noutros elementos. É colocado no mercado como uma só unidade.

- **Reservatório de água quente**

É um recipiente destinado a armazenar água quente para fornecimento de água quente e/ou de aquecimento ambiente. Este não se encontra equipado com um gerador de calor, com a exceção de um ou mais aquecedores de imersão auxiliares.

Para os próximos anos os requisitos de eficiência energética do aquecimento de água e dos reservatórios de água já se encontram estabelecidos.

O cálculo da eficiência energética do aquecimento de água (η_{wh}):

- Para os aquecedores de água tradicionais e aquecedores de água com bomba de calor, é calculado a partir da equação 4:

$$\eta_{wh} = \frac{Q_{ref}}{(Q_{fuel} + CC \cdot Q_{elec})(1 - SCF \cdot smart) + Q_{cor}} \quad (4)$$

em que SCF representa o fator de controlo inteligente, Q_{cor} é o fator de correção ambiente, Q_{fuel} é o consumo diário de combustível, Q_{ref} é a energia de referência, Q_{elec} é o consumo diário de eletricidade, CC corresponde ao coeficiente de conversão e $smart$ é o controlo inteligente.

- Para os aquecedores de água solares, é calculado a partir da equação 5:

$$\eta_{wh} = \frac{0.6 \cdot 366 \cdot Q_{ref}}{Q_{tota}} \quad (5)$$

em que:

$$Q_{total} = \frac{Q_{nonsol}}{1,1 \cdot \eta_{wh,nonsol} - 0,1} + Q_{aux} \cdot CC \quad (6)$$

Onde Q_{total} , é o consumo anual de energia, Q_{nonsol} é a contribuição calorífica não solar anual, $\eta_{wh,nonsol}$ é a eficiência energética do aquecimento de água do gerador de calor, Q_{aux} representa o consumo anual de eletricidade auxiliar.

A partir de 26 de Setembro de 2015, a eficiência energética do aquecimento de água dos aquecedores de água não deve ser inferior aos valores da Tabela 2:

Tabela 2- Eficiência energética para os diferentes perfis de carga

Perfil de carga declarado	3XS	XXS	XS	S	M	L	XL	XXL	3XL	4XL
Eficiência energética do aquecimento de água	22%	23%	26%	26%	30%	30%	30%	32%	32%	32%

As exigências de água misturada a 40 °C são apresentadas na Tabela 3:

Tabela 3- Requisitos de água misturada a 40 °C

Perfil de carga declarado	M	L	XL	XXL	3XL	4XL
Água misturada a 40 °C	65 litros	130 litros	210 litros	300 litros	520 litros	1040 litros

A partir de 26 de Setembro de 2017, a eficiência energética do aquecimento de água dos aquecedores de água não deve ser inferior aos seguintes valores:

Tabela 4- Eficiência energética para os diferentes perfis de carga

Perfil de carga declarado	3XS	XXS	XS	S	M	L	XL	XXL	3XL	4XL
Eficiência energética do aquecimento de água	32%	32%	32%	32%	36%	37%	37%	37%	37%	38%

A partir de 26 de Setembro de 2018, a eficiência energética do aquecimento de água dos aquecedores de água não deve ser inferior aos seguintes valores:

Tabela 5- Eficiência energética

Perfil de carga declarado	XXL	3XL	4XL
Eficiência energética do aquecimento de água	60%	64%	64%

No que diz respeito às medições, para efeitos de conformidade, estas devem ser efetuadas usando normas harmonizadas, cujos números de referência tenham sido publicados no *Jornal Oficial da União Europeia* ou utilizando outros métodos fiáveis, precisos e reprodutíveis, que tomem em consideração os métodos usualmente declarados como os mais avançados.

No ensaio de aquecedores de água as medições devem ser realizadas usando os perfis de carga estabelecidos para o efeito. Neste caso utilizou-se o perfil de carga do ciclo L, representado no próximo capítulo.

2.4.2 Decreto-Lei n.º118/2013

Este diploma tem o objetivo de assegurar e promover a melhoria do desempenho energético dos edifícios através do Sistema de Certificação Energética dos Edifícios (SCE), que integra o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação (REH) e o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços (RECS).

A fiscalização do SCE fica a cargo da Direção Geral de Energia e Geologia (DGEG). Quanto à qualidade do ar interior compete à Direção-Geral de Saúde e à Agência Portuguesa do Ambiente, I.P., acompanhar a aplicação do presente diploma.

O pré-certificado e o certificado SCE são considerados certificações técnicas.

No que diz respeito aos edifícios de habitação assume posição de destaque o comportamento térmico e a eficiência dos sistemas. O diploma estabelece ainda requisitos específicos para o caso de edifícios novos, sujeitos a grande intervenção ou existentes.

O parque edificado deve ainda ser progressivamente composto por edifícios com necessidades quase nulas de energia. Estes são edifícios com elevado desempenho energético e em que a satisfação das necessidades de energia resulte em grande medida de energia proveniente de fontes renováveis, originada no local ou nas proximidades.

Procede à atualização dos requisitos de qualidade térmica e introduz condições de eficiência energética para os principais tipos de sistemas técnicos de edifícios. Os sistemas de climatização, preparação de água quente sanitária, de iluminação, de aproveitamento de energias renováveis, de gestão de energia ficam deste modo sujeitos a padrões mínimos de eficiência energética.

Prossegue, juntamente com a eficiência energética, o incentivo ao uso das fontes de energia renovável, com reforço dos métodos para quantificação do respetivo contributo, destacando o aproveitamento do recurso solar. Como tal obriga a utilização da energia solar térmica ou outra fonte de energia renovável aquando da construção de novos edifícios ou na remodelação de edifícios usados. Esta é uma das principais motivações para a realização deste trabalho, a comparação entre duas fontes de energia renovável.

2.4.3 Portaria n.º349-A/2013

Esta portaria determina as competências da entidade gestora do SCE, regulamenta as atividades dos técnicos do SCE, estabelece as categorias de edifícios, para efeitos de certificação energética, assim como os tipos de pré-certificados e certificados SCE e responsabilidade pela sua emissão. Fixa as taxas de registo no SCE e determina os critérios de verificação de qualidade dos processos de certificação do SCE, bem como os elementos que deverão constar do relatório e da anotação no registo individual do perito qualificado.

2.4.4 Portaria n.º349-B/2013

No desenvolvimento do Decreto-Lei n.º118/2013, esta portaria vem definir a metodologia de determinação da classe de desempenho energético para a tipologia de pré-certificados e certificados do Sistema de Certificação Energética dos Edifícios (SCE), bem como os requisitos de comportamento técnico e de eficiência dos sistemas técnicos dos edifícios novos e edifícios sujeitos a grande intervenção.

No que diz respeito aos sistemas para aproveitamento de fontes de energia renováveis existem diversos requisitos de eficiência a cumprir.

Os sistemas de coletores solares térmicos a instalar devem proporcionar uma contribuição de energia renovável igual ou superior à calculada para um sistema idêntico ao previsto ou instalado, baseado em coletores solares padrão com as seguintes características:

- a) Orientação a Sul e com inclinação de **35°**;
- b) Apresentação dos seguintes parâmetros geométricos, óticos e térmicos:
 - i. Planos com área de abertura de **0.65 m²** por ocupante convencional;
 - ii. Rendimento ótico de **73%**;
 - iii. Coeficientes de perdas térmicas **a1=4.12 W/ (m².k)** e **a2=0.014 W/ (m².k²)**;
 - iv. Modificador de ângulo para incidência de **50°** igual a **0.91**.

Quanto aos requisitos de qualidade e manutenção, as instalações para aproveitamento de energia solar térmica a instalar devem:

- Ser compostas por sistemas e/ou coletores certificados de acordo com as Normas EN 12976:2006 ou ISO 9806:2013, respetivamente.
- Caso as instalações tenham uma área de captação superior a 20 m², devem dispor de um projeto de execução elaborado de acordo com o especificado na portaria n.º 701-H/2008, de 29 de Julho.
- Para os sistemas dotados de resistência de apoio elétrico dentro do depósito de armazenamento, incluir a instalação de um relógio programável e acessível, para atuação da resistência de forma que, durante o dia, o depósito possa receber energia proveniente do coletor solar.

Independentemente do tipo de sistema para aproveitamento de fontes de energia renováveis a instalar, estes devem:

- Respeitar os requisitos de projeto e de qualidade dos equipamentos e componentes aplicáveis no âmbito da legislação, regulamentação e normas portuguesas em vigor;
- Ser instalados por instalador qualificado para o efeito no âmbito de sistemas de qualificação ou acreditação aplicáveis, sempre que a sua avaliação decorra de:
 - i) Diretiva Europeia ou legislação nacional em vigor;
 - ii) Despacho do Diretor-Geral de Energia e Geologia.
- Registo da instalação e manutenção em base de dados criada e gerida pela entidade gestora do SCE, em condições a definir por Despacho do Diretor-Geral de Energia e Geologia.

2.4.5 Portaria n.º349-D/2013

Estabelece os requisitos de conceção relativos à qualidade térmica da envolvente e à eficiência dos sistemas técnicos dos edifícios novos, dos edifícios sujeitos a grande intervenção e dos edifícios existentes.

A Tabela 6 indica o rendimento nominal para os esquentadores e caldeiras:

Tabela 6- Rendimento nominal dos esquentadores

Caldeiras	Classe de eficiência energética	Rendimento nominal (η)
	A++	$\eta \geq 96\%$
	A+	$96\% \geq \eta > 92\%$
	A	$92\% \geq \eta > 89\%$
	B	$89\% \geq \eta > 86\%$
	C	$86\% \geq \eta > 83\%$
	D	$83\% \geq \eta > 80\%$
	E	$80\% \geq \eta > 77\%$
	F	$\eta \leq 77\%$
Esquentadores	Potência (kW)	Rendimento
	≤ 10	≥ 0.82
	> 10	≥ 0.84

No que diz respeito à preparação de água quente sanitária declara quais as condições a serem cumpridas pelos subsistemas de produção, em função do tipo de sistema ou equipamento e respetivas características técnicas.

- **Caldeira(s) e esquentador(es)**

As caldeiras a combustível líquido ou gasoso, bem como esquentadores ou outros equipamentos de queima usados em sistemas de preparação de água quente sanitária devem obedecer aos requisitos mínimos de eficiência indicados na tabela anterior.

- **Bomba de calor**

- As bombas de calor para preparação de água quente destinada a climatização e AQS devem apresentar o certificado “*European Quality Label for Heat Pumps*”, ou, em alternativa, o seu desempenho ter sido avaliado pelo mesmo referencial normativo, tendo um COP mínimo de 2,3.

- As bombas de calor para produção exclusiva de AQS devem ter um desempenho determinado de acordo com a EN 16147:2011, caracterizado por um COP mínimo de 2,3. Este valor deverá igualmente ser considerado no caso de aquecimento de águas de piscinas.

- Os ensaios relativos à avaliação de desempenho pelo referencial normativo aplicável, referidos no ponto 1 e 2, devem ser realizados por entidade acreditada para o efeito e comprovados pelo respetivo relatório de ensaio.

- **Sistemas para aproveitamento de fontes de energia renováveis**

Os mesmos requisitos das instalações para aproveitamento de energia solar térmica a instalar que estão presentes na Portaria n.º349-B/2013.

- **Termoacumuladores**

A eficiência de termoacumuladores elétricos a considerar no âmbito do presente regulamento deverá ser função das perdas estáticas do equipamento, Q_{pr} , definido segundo a EN 60379 ou outro referencial equivalente publicado em legislação ou normalização europeia, sendo determinada de acordo com a Tabela 7:

Tabela 7- Valores de eficiência de termoacumuladores em função de Q_{pr}

Intervalos de Q_{pr} [kWh/24h]	Eficiência
$Q_{pr} < 1$	0,97
$1 \leq Q_{pr} < 1,5$	0,95
$Q_{pr} \geq 1,5$	0,93

2.4.6 Norma EN 16147:2011

Esta norma com o título, Bombas de calor com compressor acionado eletricamente: Ensaios e requisitos para marcação de unidades de água quente sanitária, específica a metodologia para os testes e relatórios de classificação, explicando ainda os requisitos para o ensaio de bombas de calor com compressor acionado eletricamente.

Os testes devem decorrer sob as condições apresentadas na Tabela 8:

Tabela 8- Condições de teste para todos os sistemas

Variável medida	Valor definido
Tensão	Tensão nominal
Frequência	Frequência nominal
Fluxo de ar na fonte de calor	Nominal, indicada pelo fabricante. Se apenas é fornecido um intervalo, os testes devem decorrer com o valor máximo
Temperatura de entrada	10 °C
Fluxo de água quente	4 / 10 (l/min)

Os princípios básicos para a determinação da energia consumida são divididos em seis etapas:

- i) Período de aquecimento;
- ii) Determinação da energia de entrada;
- iii) Determinação da energia consumida e do coeficiente de performance no aquecimento de água sanitária utilizando os perfis de extração;
- iv) Determinação da temperatura de referência da água quente e da quantidade máxima de água quente utilizável numa única extração;
- v) Teste para determinar a gama de temperaturas em que se irá atuar;
- vi) Testes de segurança.

Existem 5 ciclos de extração diferentes (S, M, L, XL, XXL). O ciclo de extração a utilizar é escolhido pelo fabricante. Para este trabalho foi considerado o ciclo L, presente no Capítulo 3.

2.4.7 Decisão da Comissão: 2013/114/EU

Estabelece as orientações para os Estados-Membros no cálculo da energia renovável obtida a partir de bombas de calor de diferentes tecnologias, em conformidade com o artigo 5.º da Diretiva 2009/28/CE do Parlamento Europeu e do Conselho.

O anexo VII da Diretiva 2009/28/CE relativa às energias renováveis estabelece o método de base para o cálculo da energia renovável fornecida pelas bombas de calor. Este anexo define os três parâmetros necessários para o cálculo da energia renovável obtida a partir das bombas de calor, a ter em conta para efeitos das metas respeitantes às energias renováveis:

- A eficiência do sistema (η ou η_a);
- A quantidade estimada de energia útil fornecida pelas bombas de calor (Q_{usable});
- O fator de desempenho sazonal (SPF)

Entende-se por Q_{usable} o total estimado do calor utilizável fornecido pelas bombas de calor, calculado com o produto da capacidade nominal de aquecimento (P_{rated}) e as horas equivalentes anuais de bomba de calor (H_{HP}), expresso em GWh.

SPF é o fator de desempenho sazonal médio estimado, referente ao coeficiente de desempenho sazonal líquido em modo ativo ($SCOP_{net}$) para as bombas de calor elétricas, ou o rácio de energia primária sazonal líquida em modo ativo ($SPER_{net}$) para as bombas de calor térmicas.

Para a estimativa do SPF e Q_{usable} é necessário ter em atenção três princípios essenciais:

- A metodologia deve ser tecnicamente sólida;
- A abordagem deve ser pragmática, conciliando exatidão e relação custo/eficácia;
- Os fatores predefinidos a utilizar no cálculo da contribuição das energias renováveis obtidas a partir das bombas de calor são estabelecidos a níveis prudentes, para reduzir o risco de sobrestimação dessa contribuição.

A quantidade de energia renovável fornecida pelas tecnologias das bombas de calor (E_{RES}) deve ser calculada através da seguinte fórmula:

$$E_{RES} = Q_{usable} * (1 - 1/SPF) \quad (7)$$

$$Q_{usable} = H_{HP} * P_{rated} \quad (8)$$

Sendo:

- Q_{usable} : estimativa total do calor utilizável, fornecido pelas bombas de calor (GWh);

- H_{HP} : horas equivalentes de funcionamento a plena carga (h);

- P_{rated} : capacidade instalada das bombas de calor, tendo em conta o tempo de vida das bombas de calor (GW);

-SPF: fator de desempenho sazonal médio estimado ($SCOP_{net}$ ou $SPER_{net}$)

No que diz respeito ao desempenho mínimo das bombas de calor a considerar para efeitos de energia renovável deve-se assegurar que apenas são tidas em consideração as bombas de calor com um SPF superior a $1.15 * 1/\eta$.

Uma vez que a eficiência dos sistemas de energia (η) está fixada em 45.5%, o SPF mínimo das bombas de calor elétricas ($SCOP_{NET}$) é 2.5 para que a energia seja considerada renovável em conformidade com a Diretiva.

2.4.8 EN ISO 9806:2013

Esta norma internacional especifica os métodos de ensaio utilizados para avaliar a durabilidade, fiabilidade e segurança dos coletores para aquecimento de fluidos. Inclui ainda métodos de ensaio para a caracterização do desempenho térmico dos coletores.

Os testes a que os coletores têm de ser submetidos são:

- Teste de pressão interna para os canais de fluido;
- Teste de vazamento;
- Teste de rutura e colapso;
- Teste de resistência a alta temperatura;
- Teste de exposição;
- Teste choque térmico externo;
- Teste choque térmico interno;
- Teste de penetração da chuva;
- Teste de resistência ao congelamento;
- Teste de carga mecânica;
- Teste de resistência ao impacto;
- Teste de desempenho térmico;
- Medição da queda de pressão;
- Inspeção final.

Para todos os testes a realizar são especificados os objetivos, os aparelhos que devem ser utilizados e o procedimento a seguir durante os ensaios, as condições sobre as quais devem ocorrer os ensaios e o modo como devem ser apresentados os resultados.

3. Caso de Estudo

Como indicado no título deste trabalho foi realizada uma comparação entre duas tecnologias a fim de se concluir qual a mais indicada para o aquecimento de água quente sanitária. Neste capítulo são descritos pormenorizadamente os principais componentes dos sistemas considerados. São ainda explicitadas as condições em que se realizaram as simulações.

3.1 Descrição do sistema solar térmico

Inicialmente foi construído o sistema solar térmico em ambiente TRNSYS, tendo em atenção todos os componentes necessários. Foram também incluídos os elementos para monitorização e registo dos resultados. O sistema pode ser analisado na Figura 20:

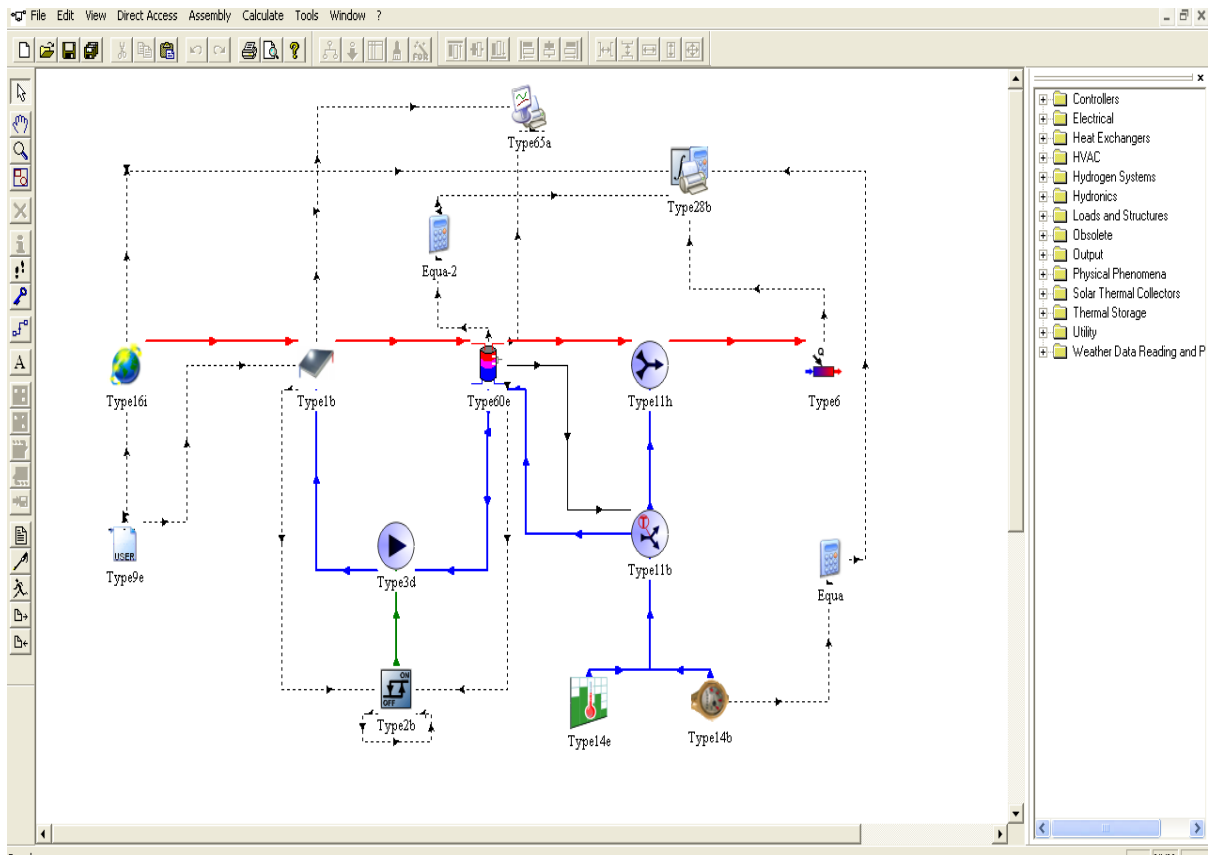


Figura 20 – Sistema utilizado na simulação do sistema solar térmico

Na Tabela 9 são apresentados os diversos componentes juntamente com os Types que os identificam no *software* TRNSYS:

Tabela 9- Componentes e type

Designação	Type
Depósito	60e
Coletor Solar	1b
Leitor de dados	9e
Processador de dados de radiação	16i
Bomba de circulação	3d

Controlador da Bomba	2b
Bypass (circuito secundário)	11b + 11h
Temperatura da água da rede	14e
Perfil de carga	14b
Aquecedor auxiliar	6
Resumo da simulação	28b
Tela de resultados	65a
Equações	

Os valores alcançados foram comparados com valores de referência a fim de validá-los. Para tal foi utilizado o programa SolTerm versão 5, em que se simulou um sistema com os mesmos elementos e os mesmos valores. O SolTerm é um programa de análise de desempenho de sistemas solares elaborado pelo LNEG e especialmente concebido para as condições climáticas de Portugal. Este permite a simulação da maioria das configurações de sistemas solares.

Seguidamente apresentam-se as principais características individuais dos elementos no TRNSYS:

3.1.1 Depósito

Considerou-se um depósito térmico vertical, estratificado, com permutador de calor interno e perdas não uniformes. Foram utilizados 5 nodos de temperatura, distanciados em 31 cm entre si, permitindo assim um bom grau de estratificação. Não foram considerados quaisquer elementos auxiliares de aquecimento no depósito.

O permutador encontra-se na parte inferior do depósito. A água da rede entra no depósito pela parte inferior e sai para o consumo pela parte superior.

Na Tabela 10 são apresentadas as suas principais características:

Tabela 10- Características do depósito

Características	Valor	Unidades
Volume	300	L
Altura	1.55	m
Coefficiente de Perdas	1.05	W/m ² .K
Área da superfície do permutador de calor	1.5	m ²
Comprimento do permutador de calor	3.0	m
Altura saída água quente	1.5	m
Fração de glicol circuito primário	0.25	

3.1.2 Coletor Solar

No que diz respeito ao coletor solar, optou-se por um coletor plano padrão definido na legislação, pois este é o tipo de coletor mais comum, sendo o mais apropriado e económico para aplicações até 80 °C, devido à sua construção simples, à baixa manutenção e variedade de modelos. Permite ainda a captação da radiação direta e difusa.

As suas principais características são apresentadas na Tabela 11:

Tabela 11- Características do coletor solar

Características	Valor	Unidades
Número de coletores	1	
Área de coletores	2.6	m ²
Rendimento ótico	73	%
Coefficiente de perdas: a ₁	4.12	W/(m ² .K)
Coefficiente de perdas: a ₂	0.014	W/(m ² .K)
Modificador de ângulo	0.91	
Ângulo de Incidência	50	Graus
Declive do coletor	35	Graus
Azimute	0	Graus

3.1.3 Bomba de circulação e circuito primário

No TRNSYS a bomba de circulação está colocada após a saída do permutador. Para o circuito primário foi calculado o caudal tendo em atenção o valor de **20 g/s/m²**. Da portaria n.º 349-B/2013 sabemos que coletor solar padrão apresenta uma área de abertura de 0.65 m²/ocupante e sendo o estudo efetuado para uma habitação T3 (4 ocupantes), a área total é de 2.6 m². A escolha de uma habitação tipo T3 justifica-se pelo facto de esta ser uma possível configuração de uma família.

O fluido que circula no circuito primário é uma mistura de água com propileno glicol não existindo mistura com a água de consumo no interior do depósito. O valor do caudal e o calor específico desta mistura encontram-se na tabela seguinte:

Tabela 12- Características do fluido que circula no circuito primário

Características	Valor	Unidades
Calor específico do fluido	3.916	kJ/kg.K
Caudal no circuito primário	187.2	Kg/h

3.1.4 Leitor de dados

Este componente tem como objetivo a leitura de dados em intervalos de tempo regulares, permitindo a conversão destes para um sistema de unidades desejado, possibilitando o uso destes dados por outras unidades do TRNSYS.

Importa referir que se realizou a interpolação dos dados climáticos, pois caso contrário existiria uma variação brusca dos valores horários (em forma de degrau). Assim sendo temos uma variação contínua dos valores da radiação, ou seja, semelhante ao que acontece na realidade.

3.1.5 Processador de dados de radiação

Para o caso particular do Type 16i é necessário conhecer a radiação difusa no plano horizontal e a radiação global no plano horizontal. Depois de analisar os dados, fornece-nos diversos valores, entre

eles, a radiação extraterrestre na horizontal, a radiação direta na horizontal, a radiação total no plano inclinado, o ângulo de incidência da radiação no plano inclinado, entre outros.

Neste estudo teve-se em consideração que o coletor se encontra numa superfície fixa, com inclinação de 35° e azimute 0°.

3.1.6 Tela de resultados

Este componente utiliza gráficos para exibir as variáveis do sistema enquanto decorre a sua simulação. O seu uso é recomendado pois fornece informações importantes, permitindo ao utilizador ver em tempo real o sistema e se este está a funcionar de acordo com o que é esperado ou não.

3.1.7 Resumo da Simulação

Através deste elemento os resultados da simulação são enviados para um ficheiro externo. Neste caso como se trata do *type 28b*, não é realizado um balanço da energia. Pode ser usado para gerar resultados diários, semanais, mensais ou sazonais das simulações, sendo estes apresentados numa tabela.

O *type 28b* integra os valores de entrada durante o intervalo de tempo da simulação, efetua operações aritméticas especificadas pelo utilizador e imprime os resultados.

3.1.8 Controlador da Bomba

O controlador está inserido no circuito primário e tem como função controlar o funcionamento da bomba de circulação. A ordem de arranque e paragem do controlador para a bomba é executada dependendo da diferença de temperatura entre a saída do coletor e o nível inferior do depósito da água.

O controlador tem ainda um controlo de temperatura máxima permitida para o funcionamento do circuito primário, neste caso 100 °C.

3.1.9 Perfil de carga

De acordo com o Regulamento N° 814/2013 da Comissão Europeia existem 10 diferentes perfis de carga (3XS, XXS, XS,S, M, L, XL, XXL, 3XL, 4XL) apresentando cada um consumos energéticos distintos.

Tendo em conta que as medições devem estar em conformidade com os requisitos presentes no Regulamento, o perfil de carga dos aquecedores de água escolhido foi o **ciclo L**, representado na Tabela 13.

Tabela 13- Perfil de carga do ciclo L. (Fonte: Regulamento (UE) N° 814/2013)

	Tempo	Energia	Tipo	Tm	Tp	f
	h:min	kWh		°C	°C	l/min
1	07:00	0.105	Small	25		3
2	07:05	1.400	Shower	40		6
3	07:30	0.105	Small	25		3
4	07:45	0.105	Small	25		3
5	08:05	3.605	Bath	10	40	10

6	08:25	0.105	Small	25		3
7	08:30	0.105	Small	25		3
8	08:45	0.105	Small	25		3
9	09:00	0.105	Small	25		3
10	09:30	0.105	Small	25		3
11	10:30	0.105	Floor Cleaning	10	40	3
12	11:30	0.105	Small	25		3
13	11:45	0.105	Small	25		3
14	12:45	0.315	Dish washing	10	55	4
15	14:30	0.105	Small	25		3
16	15:30	0.105	Small	25		3
17	16:30	0.105	Small	25		3
18	18:00	0.105	Small	25		3
19	18:15	0.105	Household cleaning	40		3
20	18:30	0.105	Household cleaning	40		3
21	19:00	0.105	Small	25		3
22	20:30	0.735	Dish washing	10	55	4
23	21:00	3.605	Bath	10	40	10
24	21:30	0.105	Small	25		3
Total		11.655				

No type 14b (perfil de carga) é necessário introduzir o intervalo de tempo entre cada extração, utilizando-se para esse fim a seguinte equação:

$$Q = m * Cp * \Delta T * \Delta t \quad (9)$$

Em que Q representa a energia em Wh , m o caudal útil da água em kg/s , Cp o calor específico da água em $J/(kg.K)$, ΔT a diferença de temperatura entre a água da rede (fria) e a água de consumo (quente) em K e Δt o tempo de duração de cada extração em h .

Os diferentes tipos de extrações existentes no ciclo do tipo L, são o small, shower, bath, floor cleaning, dish washing e household cleaning.

- **Small, floor cleaning e household cleaning**

$$Q = 105 \text{ Wh}; m = 0.05 \text{ kg/s}; Cp = 4190 \text{ J/kg.K}; \Delta T = 45 \text{ K}$$

$$\Delta t = 0.011 \text{ h}$$

- **Shower**

$$Q = 1400 \text{ Wh}; m = 0.1 \text{ kg/s}; Cp = 4190 \text{ J/kg.K}; \Delta T = 45 \text{ K}$$

$$\Delta t = 0.074 \text{ h}$$

- **Bath**

$$Q = 3605 \text{ Wh}; m = 0.17 \text{ kg/s}; C_p = 4190 \text{ J/kg.K}; \Delta T = 45 \text{ K}$$

$$\Delta t = 0.112 \text{ h}$$

- **Dish washing (1)**

$$Q = 315 \text{ Wh}; m = 0.067 \text{ kg/s}; C_p = 4190 \text{ J/kg.K}; \Delta T = 45 \text{ K}$$

$$\Delta t = 0.025 \text{ h}$$

- **Dish washing (2)**

$$Q = 715 \text{ Wh}; m = 0.067 \text{ kg/s}; C_p = 4190 \text{ J/kg.K}; \Delta T = 45 \text{ K}$$

$$\Delta t = 0.057 \text{ h}$$

A **temperatura da água da rede** considerada foi de **10 °C** para todos os meses do ano. Esta é a temperatura recomendada no ensaio das bombas de calor de acordo com a EN16147:2011, impondo deste modo as mesmas condições de ensaio e permitindo assim a comparação entre as duas soluções para o aquecimento de AQS. O sistema considerado apresenta uma **válvula bypass** entre a saída do depósito e a alimentação da água da rede, permitindo ajustar a quantidade de água quente necessária em função da temperatura de consumo desejada. O **aquecedor auxiliar** certifica que a temperatura da água de consumo desejada é sempre atingida, mesmo em dias em que a temperatura no depósito é inferior. A temperatura desejada foi definida em **55 °C** para todos os meses do ano, conseguindo assim fazer face à temperatura máxima solicitada. Para a simulação do sistema foi utilizado um time step de **15 segundos**.

3.2 Bomba de calor

A bomba de calor de expansão direta assistida por energia solar é constituída por um coletor solar termodinâmico e por um depósito de armazenamento com compressor. Esta é uma bomba de calor para a qual não existe normalização adequada no que diz respeito ao seu ensaio e caracterização do comportamento térmico, pelo que o seu estudo se baseou no artigo “*New test methodologies to analyse direct expansion solar assisted heat pumps for domestic hot water*” da autoria do Dr. Jorge Facão e da Dr.^a Maria João Carvalho, do Laboratório de Energia Solar (LES) do LNEG.

As principais características do coletor são apresentadas na Tabela 14:

Tabela 14- Características do painel solar

Comprimento	2000 mm
Altura	800 mm
Espessura	20 mm
Peso	8 kg

Na Figura 21 é apresentado o coletor considerado:



Figura 21 – Coletor Solar – evaporador da bomba de calor. (Fonte: ENERGIE, 2013)

As características do depósito com compressor estão descritas na Tabela 15:

Tabela 15 - Características do sistema

Potência nominal do compressor	455 W
Fluido frigorigénio	R 134a
Volume nominal do tanque	300 L
Volume efetivo do tanque	275 L
Superfície evaporador	1.6 m ²
Temperatura desejada	50 °C

Na Figura 22 são apresentados os componentes do depósito de armazenamento com compressor:



Figura 22 – Componentes do depósito com compressor. (Fonte: ENERGIE, 2013)

O compressor existente no depósito trabalha sempre que a temperatura no depósito seja inferior à temperatura de set-point (neste caso 50°C). O coletor solar funciona como evaporador da bomba de calor, não aquecendo isoladamente a água. Nestes sistemas é sempre necessário o compressor para preparação de AQS.

3.2.1 Método BIN modificado

O fator de desempenho sazonal (SPF) para bombas de calor utilizadas na preparação de água quente sanitária, é calculado para condições fixas de temperatura do meio ambiente. A norma europeia *EN14825:2012* apresenta o método BIN para calcular o SPF para bombas de calor. Este utiliza a média horária da temperatura do ar como entrada no método de cálculo.

Neste trabalho para o estudo do comportamento térmico da bomba de calor foi utilizada uma nova metodologia, que utiliza a **temperatura média diária do ar** e os SPF médios diários obtidos de análises experimentais.

O fator de desempenho anual é calculado a partir da equação:

$$SPF = \sum_{j=1}^n h_j \times E / (\sum_{j=1}^n h_j \times E / SPF_j) \quad (10)$$

Em que E é a energia diária total das extrações efetuadas, neste caso como se optou por um tapping do ciclo L, o valor é 11.655 kWh e h é a frequência de cada temperatura média diária.

O valor do SPF utilizado para cada temperatura média diária é calculado tendo em conta a análise da Figura 23:

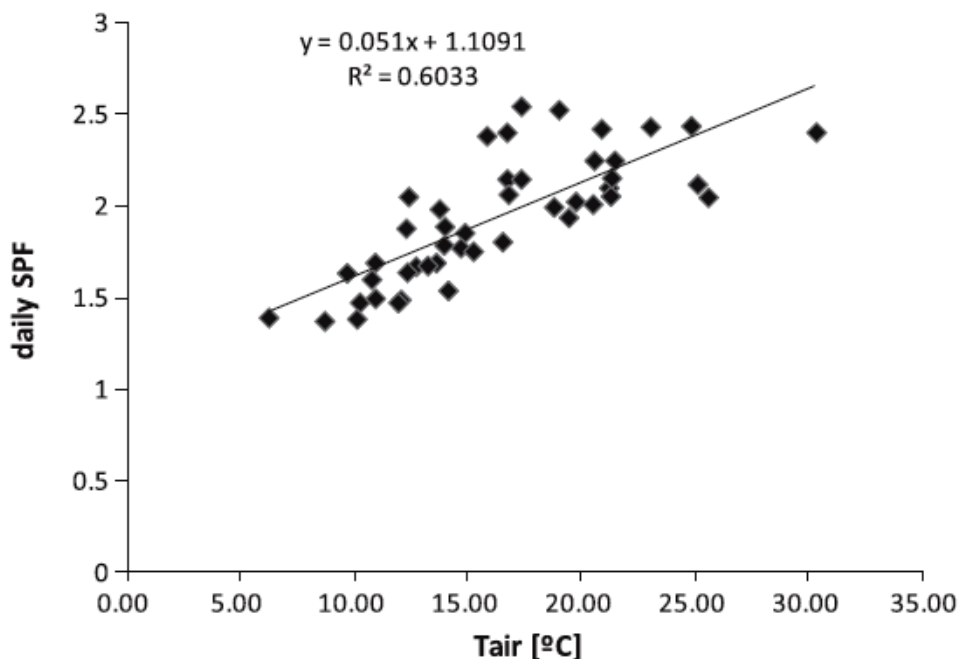


Figura 23: SPF diário como função da temperatura média diária do ar. (Fonte: Facão and Carvalho, 2013)

Deste modo é utilizada a equação 11:

$$SPF_{diário} = 0.05 T_{air} + 1.1091 \quad (11)$$

3.3 Zonas climáticas e dados climáticos

Neste trabalho será feita a comparação entre diferentes zonas de Portugal tendo por base a Nomenclatura das Unidades Territoriais para Fins Estatísticos (NUTS III), cuja composição por municípios tem por base o Decreto-Lei n.º 68/2008 de 14 de Abril de 2008, entretanto alterado pelo Decreto-Lei n.º85/2009, de 3 de Abril e pela Lei n.º21/2010 de 23 de Agosto. Com esse fim foi escolhida uma cidade de cada região como está pormenorizado na Tabela 16:

Tabela 16- NUTS III

NUTS III	Cidade escolhida
Minho-Lima	Viana do Castelo
Alto Trás-os-Montes	Bragança
Cávado	Braga
Ave	Guimarães
Grande Porto	Porto
Tâmega	Amarante
Douro	Vila Real
Entre Douro e Vouga	Santa Maria da Feira
Baixo Vouga	Aveiro
Baixo Mondego	Coimbra
Beira Interior Norte	Guarda
Beira Interior Sul	Castelo Branco
Cova da Beira	Covilhã
Serra da Estrela	Seia
Dão-Lafões	Viseu
Pinhal Interior Norte	Oliveira do Hospital
Pinhal Interior Sul	Sertã
Pinhal Litoral	Leiria
Oeste	Torres Vedras
Médio Tejo	Tomar
Lezíria do Tejo	Santarém
Grande Lisboa	Lisboa
Península de Setúbal	Setúbal
Alto Alentejo	Portalegre
Alentejo Central	Évora
Alentejo Litoral	Grândola
Baixo Alentejo	Beja
Algarve	Faro
Região Autónoma dos Açores	Ponta Delgada
Região Autónoma da Madeira	Funchal

Para uma melhor perceção das diferentes regiões de Portugal, de acordo com a divisão efetuada pela NUTS III, é apresentado na Figura 24, um mapa de Portugal, onde estão numeradas as cidades escolhidas.

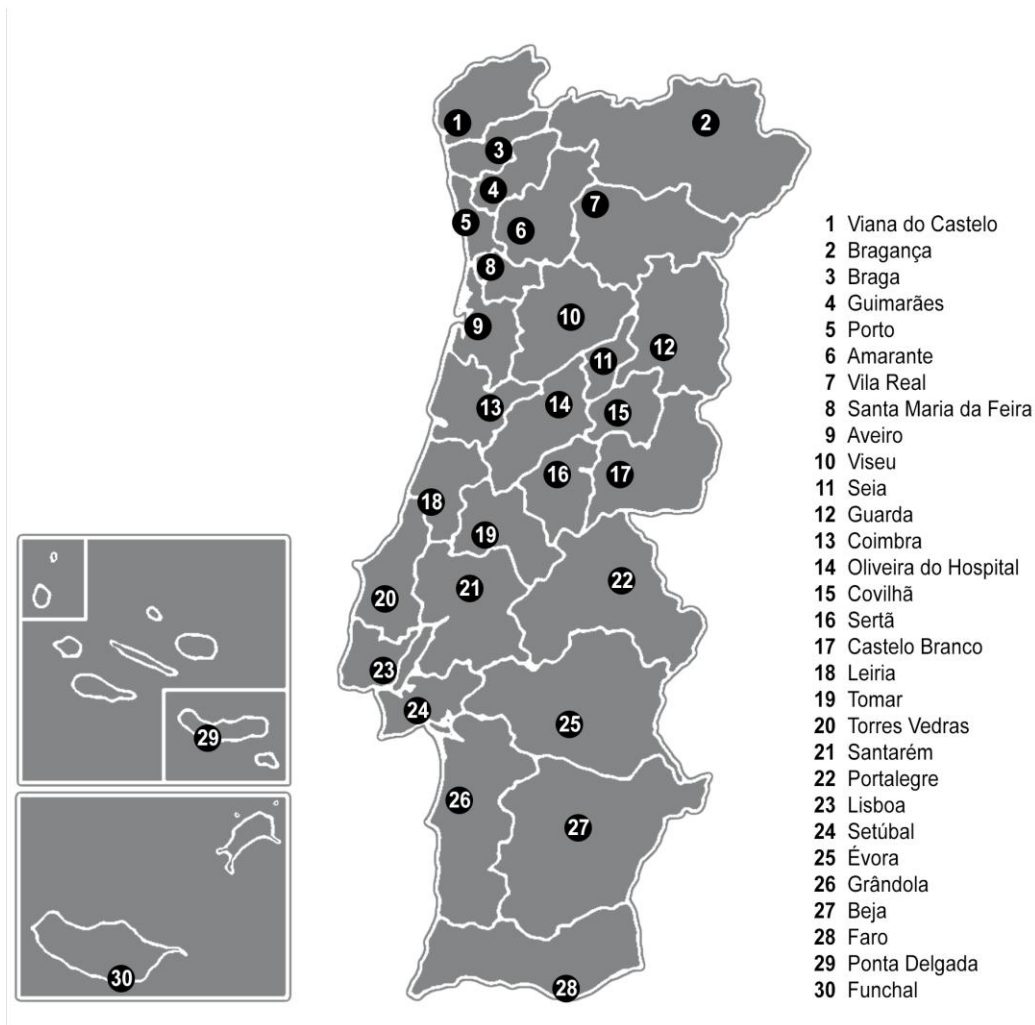


Figura 24: Mapa de Portugal com as cidades escolhidas, de acordo com a NUTS III.

Os dados climáticos de cada cidade foram obtidos a partir do *software* Climas SCE, disponibilizado pelo Laboratório Nacional de Energia e Geologia, versão 1.05 (13 de Fevereiro). Os ficheiros são fornecidos no formato para Cálculo Dinâmico Simplificado.

Nestes ficheiros são apresentados dados horários para cada dia do ano, como a temperatura (°C), a humidade relativa (%), a velocidade do vento (m/s), a radiação difusa horizontal (W.h/m) e ainda a radiação global horizontal (W.h/m).

4. Apresentação e discussão dos resultados

Após a simulação do sistema solar térmico em ambiente TRNSYS e de estudado o comportamento da bomba de calor, para as várias cidades portuguesas escolhidas, são apresentados e discutidos os resultados alcançados. Depois de obtidos no software TRNSYS, foi utilizado o software Microsoft Excel para serem efetuados os cálculos necessários e as conversões para as unidades pretendidas.

Para o sistema solar térmico são apresentados os valores da radiação incidente no plano inclinado, a energia fornecida pelo sistema solar, a energia fornecida pelo apoio energético e por fim a fração solar.

Quanto à bomba de calor analisou-se a energia elétrica consumida pelo compressor e o fator de desempenho sazonal.

Para ambos os sistemas calculou-se a energia primária consumida tendo em atenção a eficiência média na produção de energia elétrica na Europa, a eficiência média na produção de gás natural e a eficiência dos sistemas de apoio elétricos ou a gás.

Por fim realizou-se uma análise económica comparativa a 10 anos entre os diferentes sistemas, utilizando os preços de mercado da eletricidade e do gás (€/kWh), os preços dos sistemas solares térmicos de circulação forçada e da bomba de calor (sistema solar termodinâmico) e o preço do sistema de apoio a gás.

4.1 Sistema solar térmico

Para os valores apresentados na Tabela 17, foi efetuada uma simulação em ambiente TRNSYS para cada cidade.

Os valores da radiação solar incidente no plano inclinado, da energia térmica fornecida pelo sistema solar térmico e pelo sistema de apoio resultam da simulação do sistema descrito no capítulo 3.

Por fim calculou-se a fração solar (F_{sol}) que corresponde à percentagem de energia utilizada no aquecimento de água, fornecida pelo sistema solar. Para tal dividiu-se a energia fornecida pelo sistema solar (Q_{SS}) pela energia total necessária ao consumo (Q_T).

$$F_{sol} = \frac{Q_{SS}}{Q_T} \quad (12)$$

Os valores apresentados são relativos a um ano civil com 365 dias.

Tabela 17- Valores da radiação solar incidente no plano inclinado, da energia fornecida pelo sistema solar térmico e sistema de apoio e da fração solar

Cidade	Radiação incidente no plano inclinado (kWh/m ²)	Energia fornecida pelo sistema solar (kWh)	Energia fornecida pelo sistema de apoio (kWh)	Fração Solar (%)
Viana do Castelo	1736	1893	2387	44.24
Bragança	1743	1892	2387	44.22
Braga	1747	1910	2370	44.62
Guimarães	1753	1905	2375	44.51
Porto	1797	1957	2322	45.73
Amarante	1801	1954	2326	45.66

Vila Real	1803	1965	2315	45.91
Santa Maria da Feira	1820	1965	2315	45.92
Aveiro	1855	2007	2273	46.89
Coimbra	1888	2038	2242	47.62
Guarda	1847	1978	2301	46.23
Castelo Branco	1914	2105	2175	49.18
Covilhã	1886	2024	2256	47.29
Seia	1858	1975	2305	46.15
Viseu	1886	2017	2263	47.13
Oliveira do Hospital	1900	2037	2243	47.60
Sertã	1933	2080	2200	48.61
Leiria	1924	2054	2225	48.00
Torres Vedras	1960	2098	2182	49.02
Tomar	1939	2099	2180	49.05
Santarém	1975	2145	2134	50.13
Lisboa	2003	2141	2139	50.03
Setúbal	2006	2168	2111	50.66
Portalegre	1977	2151	2128	50.27
Évora	2023	2195	2085	51.29
Grândola	2071	2215	2065	51.76
Beja	2084	2256	2023	52.72
Faro	2145	2282	1998	53.31
Ponta Delgada	1540	1772	2508	41.40
Funchal	1536	1767	2513	41.28

Começando pela análise à radiação incidente os valores variam entre os 2145 kWh/m² em Faro e os 1536 kWh/m² no Funchal, correspondendo a uma diferença de 609 kWh/m². Como seria esperado as cidades situadas na região sul de Portugal continental apresentam os valores mais elevados de radiação durante o ano, pelo que as cidades de Beja, Grândola, Évora, Setúbal e Lisboa seguem-se à cidade de Faro como as que apresentam melhores níveis de radiação solar. À medida que subimos para a região centro os valores da radiação vão decrescendo e encontramos as cidades de Portalegre, Santarém, Torres Vedras, Leiria, Tomar, Sertã, Castelo Branco e Oliveira do Hospital com valores entre os 1900 kWh/m² e 1999 kWh/m². As cidades da Covilhã, Coimbra, Seia, Guarda, Viseu, Aveiro, Santa Maria da Feira, Amarante e Vila Real agrupam-se com valores entre os 1800 kWh/m² e os 1899 kWh/m². Em Portugal continental são as cidades mais a norte como o Porto, Guimarães, Braga, Bragança e Viana do Castelo, que têm menos radiação ao longo do ano. A nível nacional são as Regiões Autónomas da Madeira e dos Açores que exibem os piores resultados, 1536 kWh/m² e 1540 kWh/m², respetivamente. Em grande parte estes baixos valores devem-se ao clima característico dos arquipélagos.

Na Figura 25 é possível conferir de um modo simples a distribuição da radiação incidente no plano inclinado para todas as cidades escolhidas.

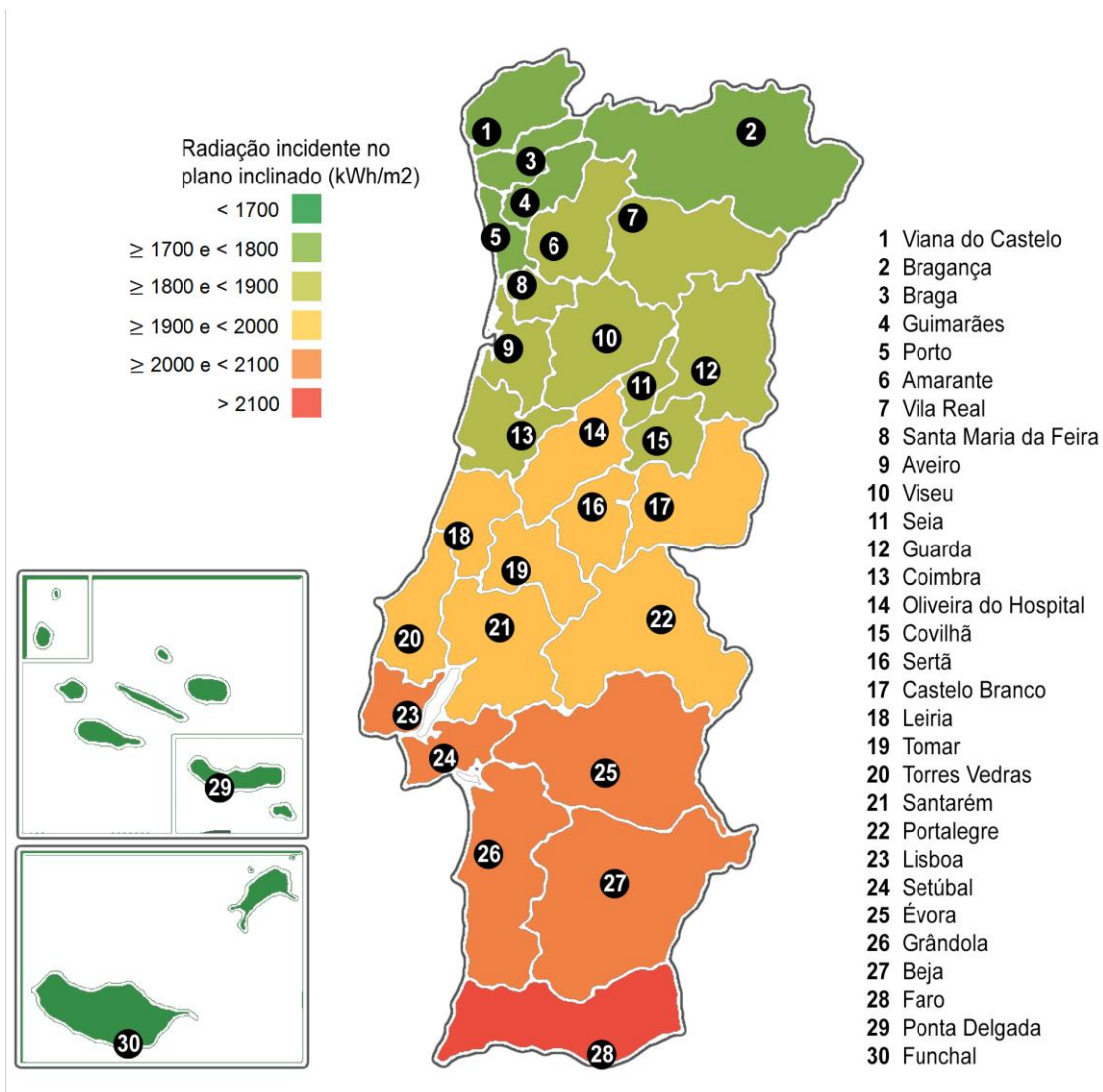


Figura 25: Radiação Incidente no plano inclinado.

No que diz respeito à energia fornecida pelo sistema solar o intervalo de valores vai dos 2282 kWh em Faro aos 1767 kWh no Funchal, uma variação de 515 kWh. Como seria expectável são as localidades da região sul de Portugal que fornecem mais energia. As cidades de Beja e Grândola juntam-se a Faro com mais de 2200 kWh fornecidos. As cidades de Évora, Setúbal, Lisboa, Santarém, Portalegre e Castelo Branco fornecem entre 2100 kWh e 2200 kWh. Na região centro as cidades de Torres Vedras, Leiria, Tomar, Sertã, Oliveira do Hospital, Coimbra, Covilhã, Viseu e Aveiro proporcionam entre 2000 kWh e 2100 kWh de energia. Subindo no mapa encontramos as localidades de Seia, Guarda, Vila Real, Santa Maria da Feira, Amarante, Porto, Guimarães e Braga com níveis de radiação entre os 1900 kWh e os 2000 kWh. Em Portugal continental são Viana do Castelo e Bragança com valores entre 1800 kWh e 1900 kWh. Tal como no caso da radiação incidente, Ponta Delgada acompanha o Funchal com os piores resultados.

Neste parâmetro é de realçar o facto de determinadas cidades apresentarem valores de radiação superiores a outras, exibindo no entanto valores mais baixos de energia térmica fornecida. Por exemplo a cidade de Viana do Castelo apresenta um valor de radiação inferior a Bragança e no entanto fornece mais energia a partir do sistema solar. O mesmo sucede entre Braga e Guimarães, Porto e Amarante, Covilhã e Viseu, entre Castelo Branco e cidades como a Sertã, Leiria, Torres Vedras e Tomar ou para finalizar entre Santarém e Lisboa. Uma justificação poderá ser a distribuição anual da radiação, em que algumas cidades têm a radiação mais distribuída ao longo do ano enquanto

outras têm a radiação mais concentrada apenas numa altura do ano (Verão). Um outro parâmetro relevante é a temperatura exterior do ar, que tem influência nas perdas térmicas do coletor solar.

A disposição das diferentes quantidades de energia fornecida pelo sistema solar térmico encontra-se na Figura 26.

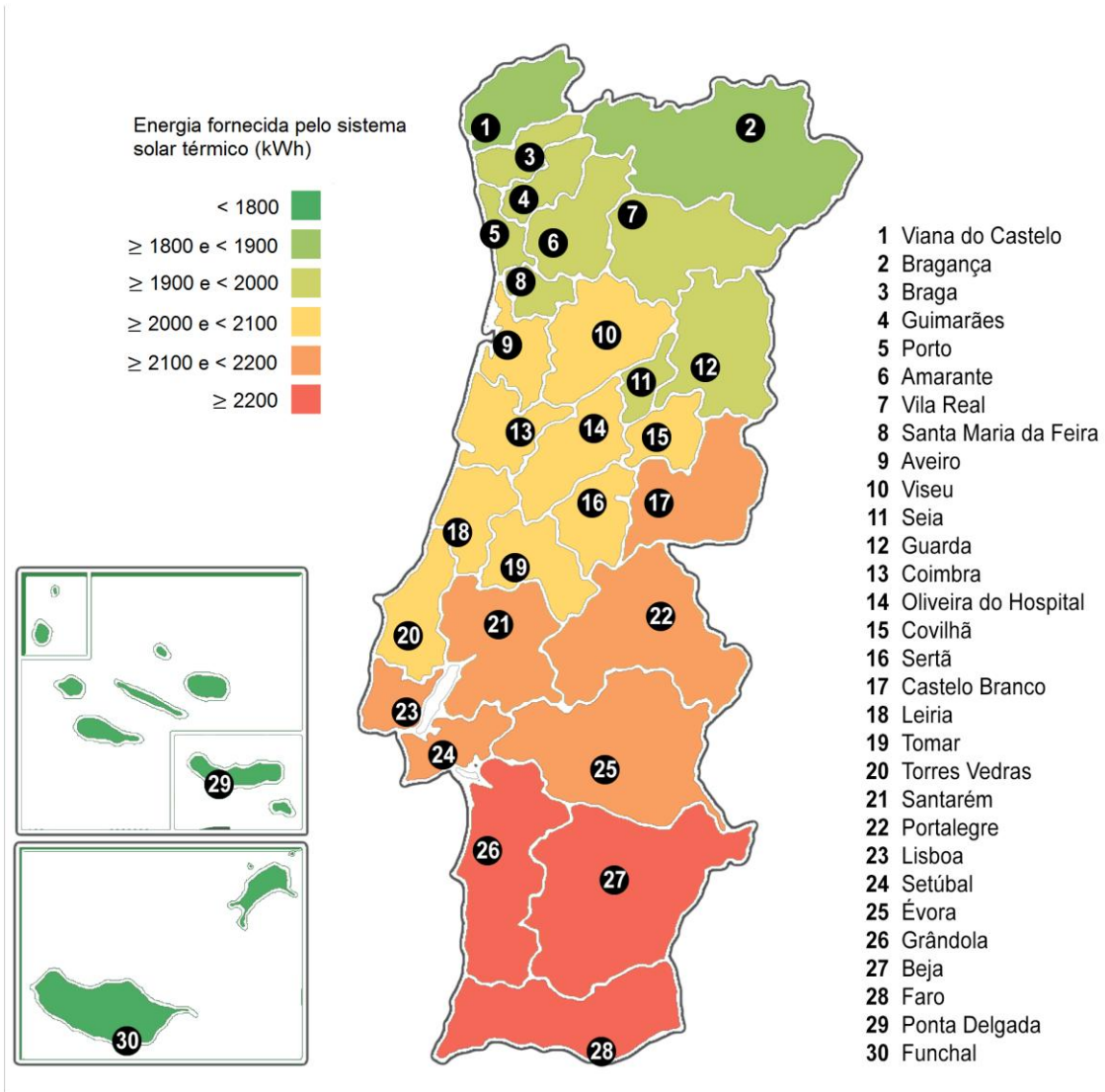


Figura 26: Energia fornecida pelo sistema solar térmico.

Sabendo que a energia diária consumida é fixa, a energia térmica fornecida pelo sistema de apoio é maior nas cidades que exibem menores valores de energia proporcionada pelo sistema solar, como se observa na Figura 27.

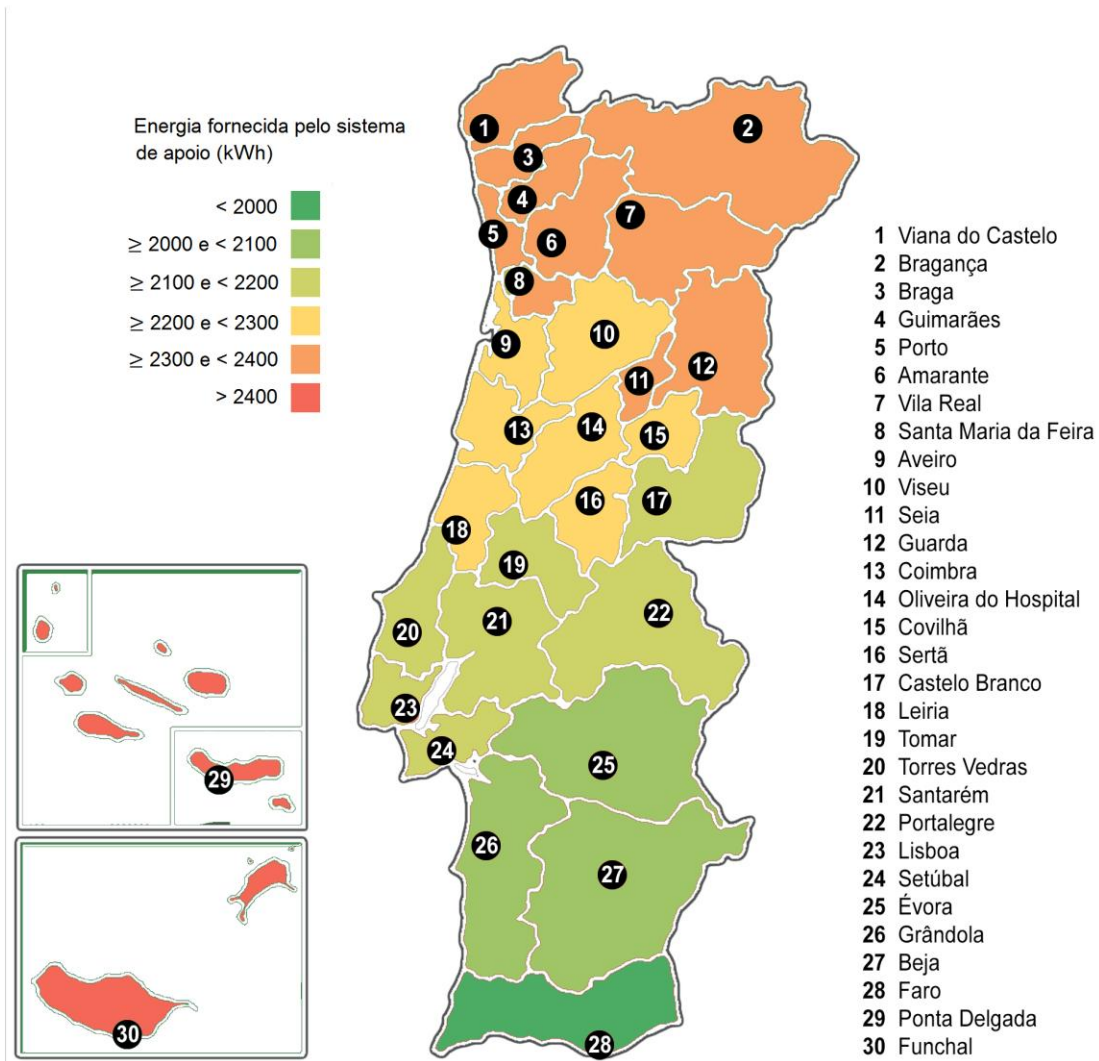


Figura 27: Energia fornecida pelo sistema de apoio.

Focando a análise na fração solar, observa-se que esta atinge o maior valor em Faro com 53.31% e o menor valor no Funchal com 41.28%, uma variação de cerca de 12 %. A partir dos valores alcançados pode-se afirmar que existem 8 cidades (Santarém, Lisboa, Setúbal, Portalegre, Évora, Grândola, Beja e Faro) em que o sistema solar é capaz de fazer face a pelo menos metade das necessidades energéticas, no que diz respeito a águas quentes sanitárias.

Na Figura 28 apresenta-se o mapa de Portugal com os diferentes valores da fração solar.

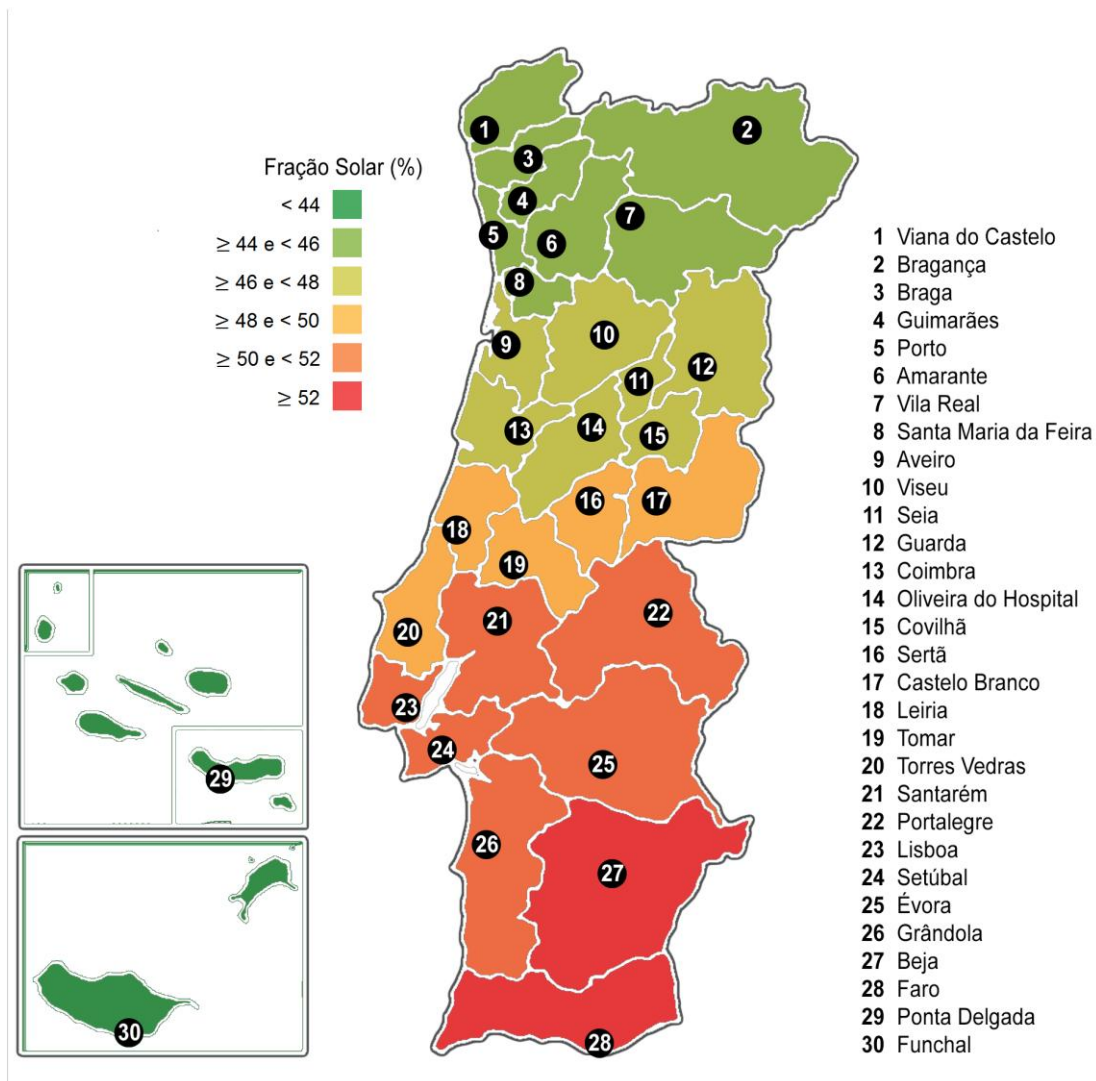


Figura 28: Fração Solar

4.2 Bomba de calor

O estudo do comportamento da bomba de calor baseou-se no artigo “*New test methodologies to analyse direct expansion solar assisted heat pumps for domestic hot water*” da autoria do Dr. Jorge Facão e da Dr.^a Maria João Carvalho, do Laboratório de Energia Solar (LES) do LNEG.

Este sistema foi testado para todas as cidades consideradas na Tabela 16, utilizando o método BIN modificado. Este método permite o cálculo do SPF anual, tendo em atenção a temperatura média diária do ar, a sua frequência ao longo do ano e o valor do SPF diário. As tabelas com os valores do SPF diário para cada uma das cidades encontram-se em anexo.

Um dos objetivos do estudo do comportamento da bomba de calor é conhecer o consumo de energia elétrica do compressor (Q_C). Com esse fim determinou-se a energia térmica fornecida pela bomba de calor ao longo do ano (Q_{BC}) e dividiu-se pelo valor do SPF anual (SPF).

$$Q_C = \frac{Q_{BC}}{SPF} \quad (13)$$

Na tabela 18 são apresentados os valores obtidos:

Tabela 18- Consumo energia elétrica pelo compressor e SPF anual.

Cidade	Energia elétrica consumida pelo compressor (kWh)	SPF anual
Viana do Castelo	2312	1.84
Bragança	2389	1.78
Braga	2277	1.87
Guimarães	2312	1.84
Porto	2225	1.91
Amarante	2286	1.86
Vila Real	2309	1.84
Santa Maria da Feira	2292	1.86
Aveiro	2243	1.90
Coimbra	2230	1.91
Guarda	2363	1.80
Castelo Branco	2162	1.97
Covilhã	2297	1.85
Seia	2360	1.80
Viseu	2316	1.84
Oliveira do Hospital	2283	1.86
Sertã	2254	1.89
Leiria	2252	1.89
Torres Vedras	2207	1.93
Tomar	2217	1.92
Santarém	2159	1.97
Lisboa	2168	1.96
Setúbal	2148	1.98
Portalegre	2162	1.97
Évora	2146	1.98
Grândola	2166	1.96
Beja	2122	2.00
Faro	2135	1.99
Ponta Delgada	2099	2.03
Funchal	2116	2.01

Ao contrário do que sucede com o sistema solar térmico, as cidades que apresentam os melhores resultados são Ponta Delgada e Funchal, com um fator de desempenho sazonal de 2.03 e 2.01, respetivamente. Na ponta oposta encontra-se a cidade de Bragança com 1.78. Comparando as duas principais cidades do país, Lisboa apresenta um SPF de 1.96 enquanto o Porto um SPF de 1.91.

As cidades com melhor SPF são aquelas que têm uma temperatura média diária mais elevada, sendo consequentemente estas as cidades com menor consumo de energia por parte do compressor. Os arquipélagos ao apresentarem um clima temperado ao longo do ano, proporcionam bons resultados

para a bomba de calor. O mesmo sucede com a região sul de Portugal continental que revela valores próximos dos melhores.

Pelo contrário são as localidades da região interior norte que apresentam os piores resultados, devido à temperatura média diária mais baixa durante o ano.

A distribuição dos valores alcançados encontra-se na Figura 29.

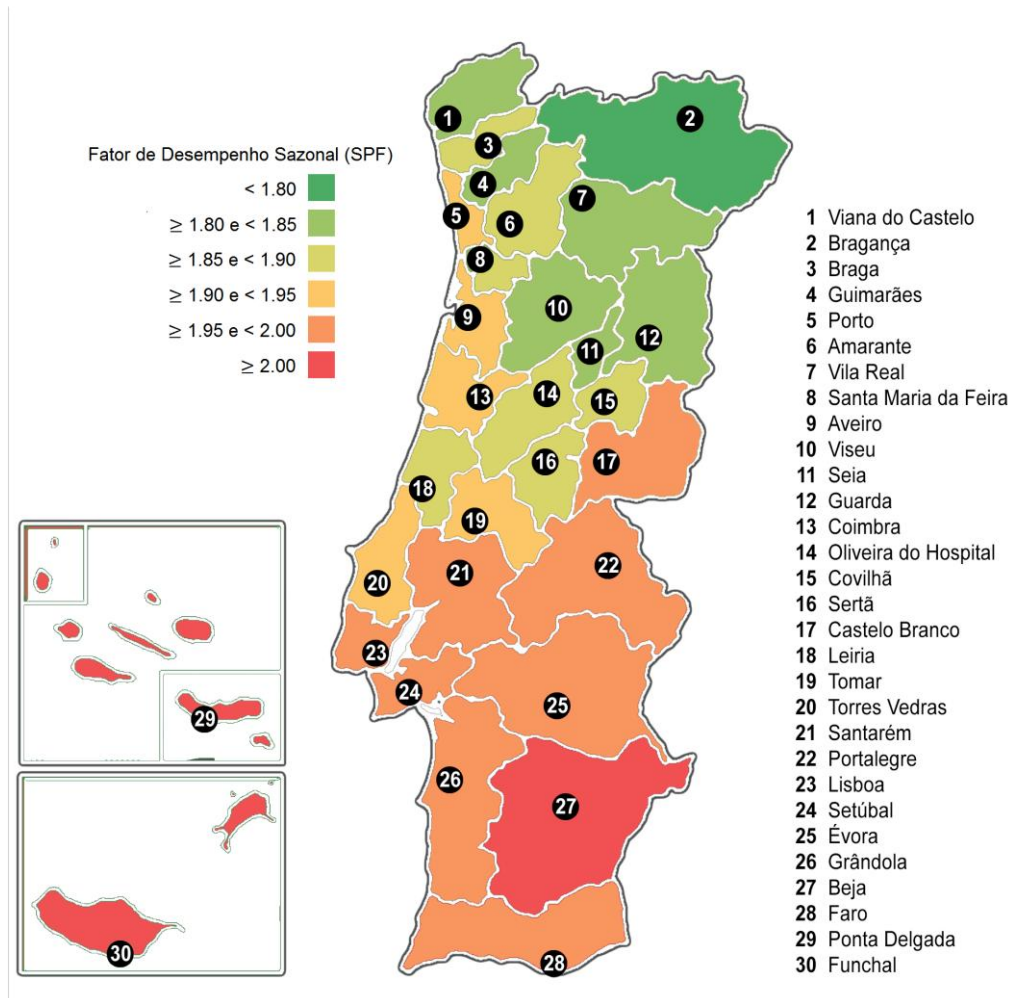


Figura 29: Fator de desempenho sazonal (SPF).

4.3 Consumo de energia primária

Entende-se por energia primária toda a energia existente na natureza e utilizável sem qualquer processo de conversão (DGEG, 2014). Este é um tema com grande relevância tanto a nível nacional como internacional, pelo que existem diversas medidas que visam a diminuição do seu consumo.

Ao nível das políticas europeias de energia e de combate às alterações climáticas, foi adotado, em dezembro de 2008, o Pacote “Energia-Clima”, que fixa, para 2020, a redução de 20% do consumo de energia primária, em comparação aos níveis de 1990. (APA, 2013)

Em Portugal, a Resolução do Conselho de Ministros n.º 20/2013, de 10 de Abril, aprovou o Plano Nacional de Ação para a Eficiência Energética para o período 2013-2016 e o Plano Nacional de Ação

para as energias Renováveis para o período 2013-2020. Até 2020 existe o objetivo geral de reduzir o consumo de energia primária em 25%. (APA, 2013)

Para a análise da energia primária consumida, é necessário ter em atenção, a eficiência na produção de eletricidade assim como na extração e distribuição de gás natural, e para o caso do sistema solar térmico, se o sistema de apoio utilizado é um esquentador a gás natural ou uma resistência elétrica.

O valor médio da eficiência na produção e distribuição de eletricidade na Europa está presente na Decisão 2013/114/UE da Comissão, e é de 0.455, enquanto a eficiência da extração de gás natural, incluindo as perdas de distribuição está presente na diretiva 2012/27/EU, e é de 0.91.

Os valores da eficiência dos sistemas de apoio estão presentes na Portaria n.º349-D/2013 e são para o caso elétrico de 0.95 enquanto para o caso a gás de 0.82.

Para os valores apresentados na Tabela 19, no caso do sistema solar térmico, dividiu-se o valor da energia fornecida através do sistema de apoio pela eficiência de produção e pela eficiência do sistema de apoio, variando os valores para o caso do sistema de apoio ser elétrico ou a gás natural. Para a bomba de calor dividiu-se o valor da energia consumida pelo compressor apenas pela eficiência na produção e distribuição de eletricidade.

Tabela 19- Consumo de energia primária

Cidade	Sistema solar térmico com apoio elétrico (kWh)	Sistema solar térmico com apoio a gás (kWh)	Bomba de calor (kWh)
Viana do Castelo	5521	3198	5082
Bragança	5523	3199	5250
Braga	5483	3176	5004
Guimarães	5494	3182	5081
Porto	5373	3112	4890
Amarante	5380	3117	5025
Vila Real	5355	3102	5074
Santa Maria da Feira	5355	3102	5037
Aveiro	5259	3046	4930
Coimbra	5187	3004	4900
Guarda	5324	3084	5194
Castelo Branco	5031	2914	4752
Covilhã	5219	3023	5049
Seia	5332	3088	5186
Viseu	5235	3032	5091
Oliveira do Hospital	5188	3005	5019
Sertã	5089	2948	4955
Leiria	5148	2982	4948
Torres Vedras	5048	2924	4850
Tomar	5045	2922	4872
Santarém	4938	2860	4744
Lisboa	4948	2866	4765
Setúbal	4885	2830	4721
Portalegre	4924	2852	4751

Évora	4823	2794	4717
Grândola	4777	2767	4760
Beja	4681	2711	4665
Faro	4623	2678	4693
Ponta Delgada	5802	3361	4614
Funchal	5814	3368	4650

Como se observa nos resultados apresentados, o sistema que apresenta o menor consumo de energia primária é o sistema solar térmico com sistema de apoio a gás. De seguida surge o sistema com bomba de calor e por último o sistema solar térmico com apoio elétrico (a exceção é Faro em que o sistema solar térmico com apoio elétrico apresenta um menor consumo comparativamente à bomba de calor). Tal sucede devido à grande diferença de eficiência na produção e distribuição de eletricidade comparativamente ao gás natural.

O valor mais baixo para o consumo de energia primária é conseguido pela cidade de Faro, com 2678 kWh, no caso do sistema solar térmico com apoio a gás. Para este tipo de sistema as cidades com maior gasto de energia são o Funchal e Ponta Delgada, com 3368 kWh e 3361 kWh, respetivamente.

Na Figura 30 é possível visualizar a divisão das regiões de acordo com os valores conseguidos, verificando-se que o consumo de energia primária aumenta da região sul para a região norte, como esperado.

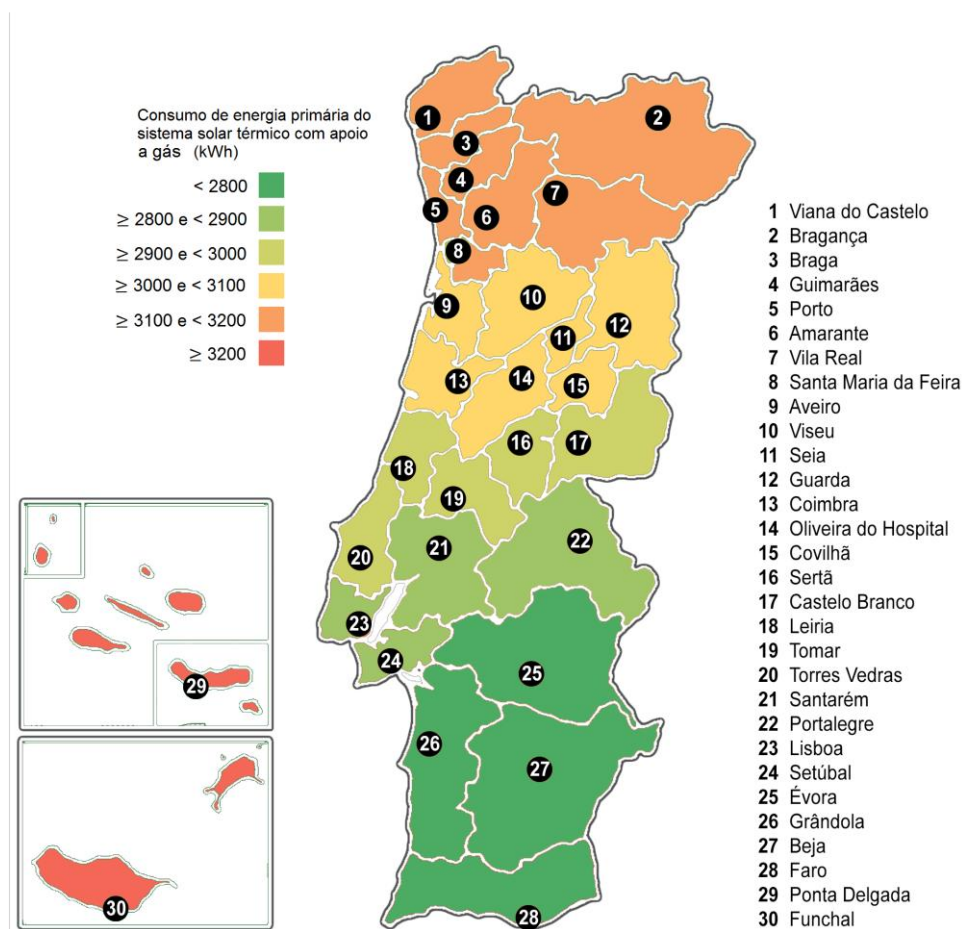


Figura 30: Consumo de energia primária do sistema solar térmico com apoio a gás.

Para o sistema solar térmico com apoio elétrico é também a cidade de Faro que apresenta o menor consumo de energia primária com 4623 kWh, enquanto as cidades do Funchal e Ponta Delgada exibem os piores valores, com 5814 kWh e 5802 kWh, respetivamente. São aproximadamente 1200 kWh de diferença entre a melhor e pior localização.

A distribuição dos resultados encontra-se na Figura 31.

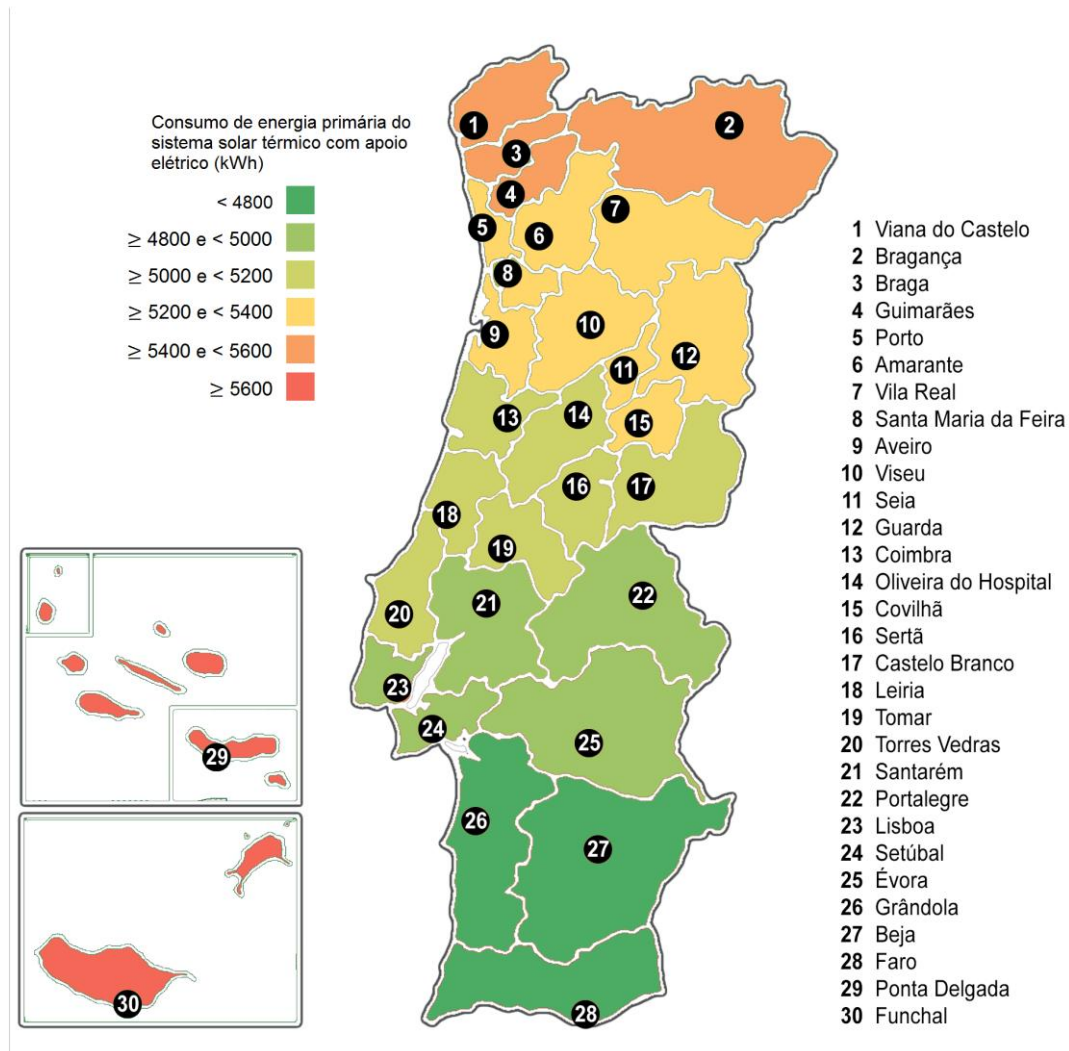


Figura 31: Consumo de energia primária do sistema solar térmico com apoio elétrico.

Por último temos o sistema com bomba de calor, em que Ponta Delgada e o Funchal exibem os melhores resultados com 4614 kWh e 4650 kWh, respetivamente. A cidade que apresenta o maior consumo de energia primária é Bragança com 5250 kWh. Existe portanto um intervalo de cerca de 600 kWh entre os dois extremos.

Como se observa na Figura 32, as regiões do interior norte são aquelas que manifestam um maior consumo de energia primária. Destaca-se ainda a cidade do Porto que exibe um baixo consumo, tendo em atenção a sua localização.

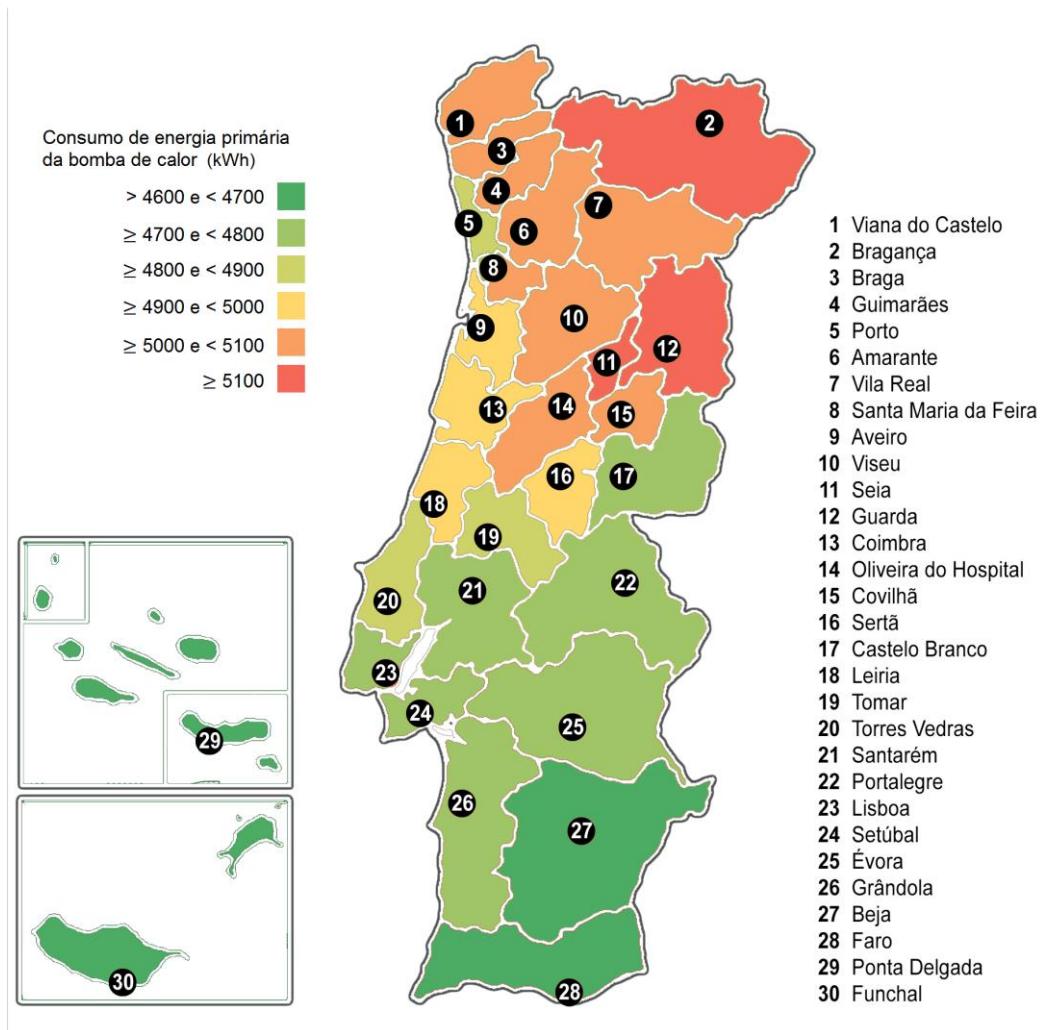


Figura 32: Consumo de energia primária da bomba de calor.

Se focarmos a comparação apenas nos sistemas que utilizam energia elétrica, percebemos que a diferença em algumas cidades é muito pequena (regiões que dispõem de mais radiação solar), existindo, como já foi referido, o exemplo de Faro em que o sistema solar térmico é mais favorável que a bomba de calor.

No que diz respeito ao consumo de energia primária foi ainda efetuado o cálculo para todas as cidades, do SPF que uma bomba de calor teria de ter, de modo a consumir a mesma energia primária que o sistema solar térmico com apoio a gás (solução mais vantajosa). Os valores são apresentados na Tabela 20:

Tabela 20- SPF necessário para igualar consumo de energia primária

Cidade	Sistema solar térmico com apoio a gás (kWh)	SPF necessário
Viana do Castelo	3198	2.92
Bragança	3199	2.92
Braga	3176	2.94
Guimarães	3182	2.94
Porto	3112	3.00

Amarante	3117	3.00
Vila Real	3102	3.01
Santa Maria da Feira	3102	3.01
Aveiro	3046	3.07
Coimbra	3004	3.11
Guarda	3084	3.03
Castelo Branco	2914	3.21
Covilhã	3023	3.09
Seia	3088	3.03
Viseu	3032	3.08
Oliveira do Hospital	3005	3.11
Sertã	2948	3.17
Leiria	2982	3.14
Torres Vedras	2924	3.20
Tomar	2922	3.20
Santarém	2860	3.27
Lisboa	2866	3.26
Setúbal	2830	3.30
Portalegre	2852	3.28
Évora	2794	3.35
Grândola	2767	3.38
Beja	2711	3.45
Faro	2678	3.49
Ponta Delgada	3361	2.78
Funchal	3368	2.78

Os valores alcançados demonstram que quanto menor o consumo de energia primária que desejamos igualar, maior terá de ser o fator de desempenho sazonal da bomba de calor. Assim, para as regiões mais a sul de Portugal continental a bomba de calor terá de apresentar um maior fator de desempenho. Para cidade de Faro, será necessário um SPF de 3.49. No ponto oposto encontram-se as cidades de Ponta Delgada e do Funchal, em que um SPF de 2.78, permite alcançar o mesmo consumo de energia primária que o sistema solar térmico com apoio a gás.

Estes são resultados alcançáveis atualmente, pois já existem bombas de calor com um fator de desempenho sazonal superior a 3.

A Figura 33 mostra a distribuição do fator de desempenho sazonal necessário para igualar o consumo de energia primária do sistema mais vantajoso, ao longo das diferentes regiões de Portugal.

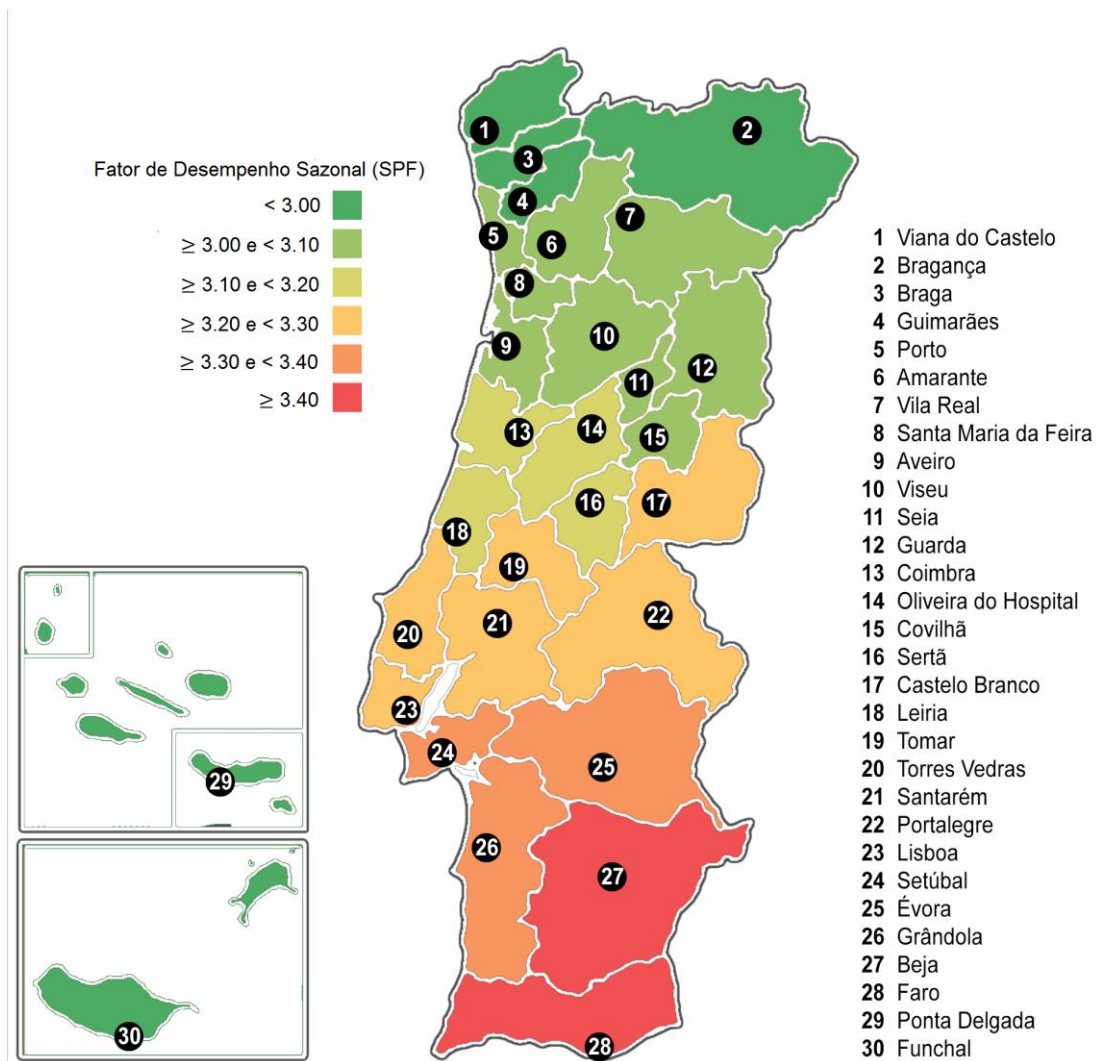


Figura 33: Fator de desempenho sazonal necessário para igualar o consumo de energia primária do sistema solar térmico com apoio a gás.

4.4 Cálculos económicos

Para uma melhor comparação entre os diferentes sistemas optou-se pela realização de uma análise financeira, sendo para tal necessário conhecer os diversos preços existentes no mercado e ainda o preço da eletricidade e do gás.

Na tabela seguinte são apresentados os modelos dos sistemas solares térmicos, da bomba de calor, do sistema de apoio e o preço de cada:

Tabela 21- Preços dos sistemas e do sistema de apoio

Componente	Modelo	Preço (€)
Sistema solar térmico com circulação forçada	HOT 201 (Solar Energy)	2445
Bomba de calor (sistema solar termodinâmico)	Eco 300 esm (Energie)	2074

Esquentador a gás	WTDKG 11 KG 23 (Vulcano)	276
-------------------	--------------------------	-----

Apenas é apresentado o preço do sistema de apoio a gás, pois os sistemas solares térmicos vêm sempre equipados com uma resistência elétrica de *backup*. O sistema solar térmico com circulação forçada escolhido para os cálculos económicos tem um depósito com capacidade de 200 L. Esta escolha justifica-se pela dimensão da área de captação. Para o modelo escolhido é de 2.5 m², próxima dos 2.6 m² do sistema estudado neste trabalho. Se a opção recaísse num sistema com um depósito com capacidade de 300 L (depósito usado no estudo) a área de captação seria de 5 m², praticamente o dobro da área que foi estudada.

Os preços da eletricidade (EDP, tarifa simples) e do gás natural (Lisboagás, Escalão 1) considerados foram:

Tabela 22- Preço da eletricidade e do gás natural no ano 2014. (Fonte: ERSE, 2014)

Tipo de energia	Preço (€/kWh)
Eletricidade	0.1497
Gás Natural	0,0757

Aos preços apresentados nas Tabelas 21 e 22 é necessário acrescentar o valor do IVA (23%).

Uma vez que se pretende obter valores para um intervalo de 10 anos é necessário ter em atenção a taxa de inflação do custo da energia elétrica e do gás natural. Para este estudo considerou-se a taxa de inflação medida através do deflator do PIB, permitindo assim a atualização dos custos. O deflator do PIB é um instrumento utilizado para medir a inflação registada num determinado espaço económico. É um indicador de periodicidade anual que integra os preços de todos os bens e serviços que existem numa economia. O deflator do PIB permite que sejam automaticamente refletidas na inflação medida, todas as alterações aos padrões de consumo, assim como a introdução de novos bens e serviços. (DEO, 2013)

No Documento de Estratégia Orçamental para o período 2013-2017, são apresentadas previsões para o valor do Deflator do PIB. Assim utilizaram-se os valores apresentados neste documento para os anos entre 2015 e 2017, sendo que para os anos seguintes efetuou-se uma estimativa dos valores.

Tabela 23- Deflator do PIB (%).

2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
1.2	1.7	1.5	1.4	1.6	1.4	1.5	1.7	1.6	1.3

Deste modo para se saber o preço da eletricidade ou do gás natural para o ano seguinte, é necessário multiplicar o preço do ano corrente pelo valor do deflator do PIB para o ano seguinte.

A energia fornecida pelo sistema de apoio ao longo do ano (Q_{SA}) é multiplicada pelo preço da eletricidade (P_E) ou do gás natural (P_G) dependendo do sistema de apoio, ao qual se somam os preços dos sistemas utilizados (preço do sistema solar térmico (P_{SS}), preço do sistema de apoio a gás (P_{AG}) e preço da bomba de calor (P_{BC}). O preço do gás natural e da eletricidade varia de ano para ano de acordo com o deflator do PIB.

Para o caso do sistema solar térmico com sistema de apoio elétrico, a equação usada é a 14:

$$Custo = \left(\sum_{n=1}^{10} Q_{SA} \times P_{E_n} \right) + P_{SS} \quad (14)$$

Para o sistema solar térmico com sistema de apoio a gás, utilizamos a equação 15:

$$Custo = \left(\sum_{n=1}^{10} Q_{SA} \times P_{G_n} \right) + P_{SS} + P_{AG} \quad (15)$$

Para o sistema com bomba de calor, usamos a equação 16:

$$Custo = \left(\sum_{n=1}^{10} Q_{SA} \times P_{E_n} \right) + P_{BC} \quad (16)$$

Por fim na tabela 23 são apresentados os resultados obtidos:

Tabela 24- Custo total do sistema ao fim de 10 anos

Cidade	Sistema solar térmico com apoio elétrico (€)	Sistema solar térmico com apoio a gás (€)	Bomba de calor (€)
Viana do Castelo	8215	5980	7597
Bragança	8216	5981	7763
Braga	8179	5962	7519
Guimarães	8189	5967	7596
Porto	8075	5910	7406
Amarante	8082	5913	7540
Vila Real	8059	5901	7589
Santa Maria da Feira	8058	5901	7552
Aveiro	7967	5855	7446
Coimbra	7899	5821	7416
Guarda	8029	5886	7708
Castelo Branco	7753	5747	7269
Covilhã	7930	5836	7563
Seia	8036	5890	7700
Viseu	7945	5844	7605
Oliveira do Hospital	7901	5821	7534
Sertã	7807	5774	7470
Leiria	7863	5802	7464
Torres Vedras	7769	5755	7367
Tomar	7765	5753	7389
Santarém	7665	5702	7261
Lisboa	7674	5707	7282
Setúbal	7615	5677	7238
Portalegre	7652	5695	7268
Évora	7557	5647	7234
Grândola	7512	5625	7277
Beja	7422	5579	7182
Faro	7367	5552	7210

Ponta Delgada	8479	6114	7132
Funchal	8491	6120	7168

O sistema que apresenta os custos mais baixos ao fim de 10 anos é o sistema solar térmico com sistema de apoio a gás, depois encontra-se o sistema de bomba de calor e o sistema mais caro é o sistema solar térmico com apoio elétrico. O baixo preço do gás relativamente ao preço da energia elétrica é o fator diferenciador no custo final das diferentes tecnologias, pois se compararmos apenas os custos dos equipamentos utilizados no sistema solar térmico (sistema de circulação forçada + sistema de apoio), o sistema com apoio elétrico é mais barato que o sistema que usa o esquentador a gás. O mesmo sucede com o sistema da bomba de calor, que se apresenta como o equipamento mais barato, mas devido ao facto de o compressor utilizar energia elétrica acaba por ficar mais dispendioso que o sistema solar térmico com apoio a gás.

Começando pela opção mais barata, sistema solar térmico com apoio a gás, a cidade que apresenta os custos mais baixos é Faro, com 5552 €, enquanto os piores resultados são apresentados pela cidade do Funchal, com 6120 €. A diferença entre as duas cidades é de 568€, o que se pode considerar uma diferença pouco significativa se atendermos ao período de utilização (10 anos).

Na Figura 34 é apresentado o custo do sistema solar térmico com apoio a gás, para as diferentes localidades escolhidas.

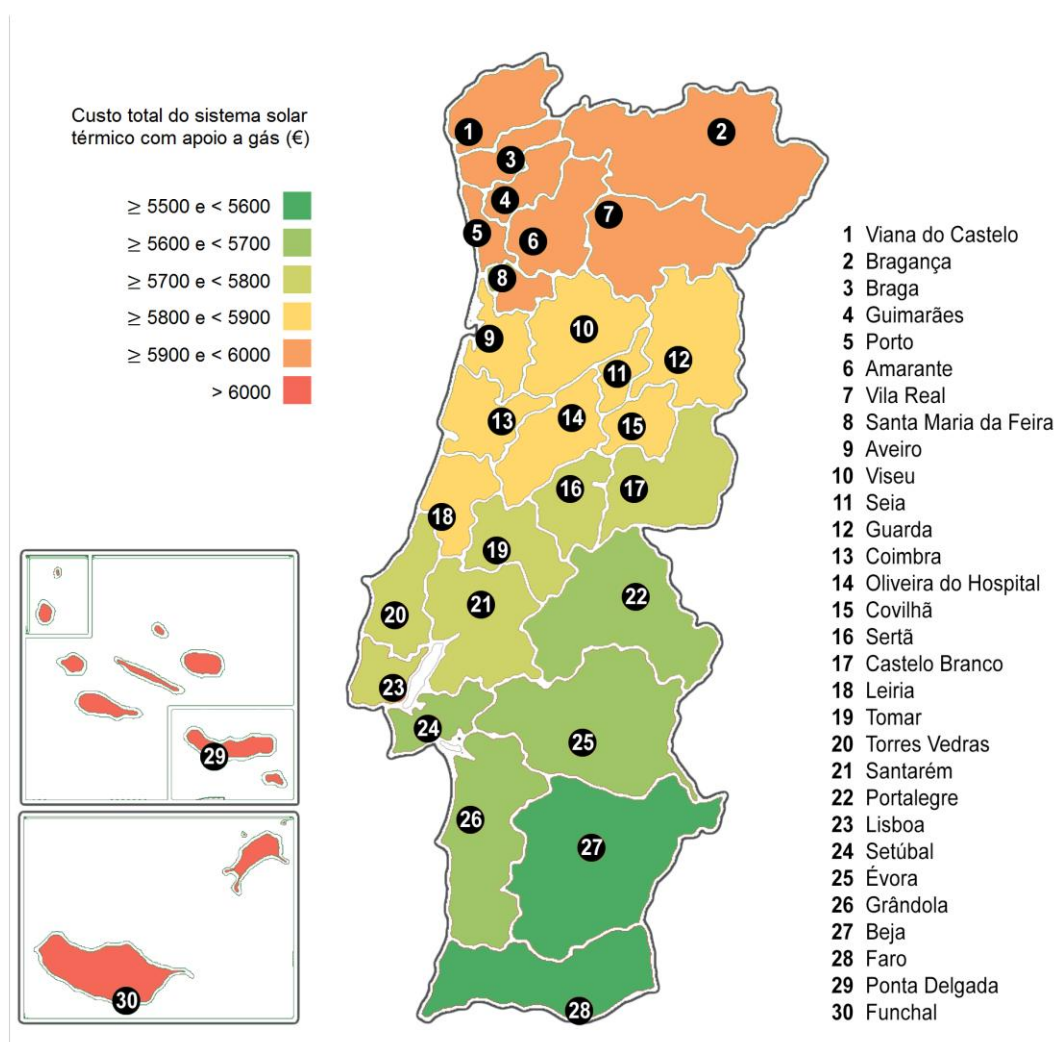


Figura 34: Custo total do sistema solar térmico com apoio a gás.

Relativamente ao sistema solar térmico com apoio elétrico, sistema mais caro, é na cidade de Faro que encontramos o menor custo final, com 7367 €, e na cidade do Funchal o maior, com 8491 €, uma diferença de 1124 €. Tal como no caso do sistema de apoio a gás, o custo do sistema solar térmico aumenta da região sul para a região norte de Portugal continental, sendo que é nos arquipélagos que fica mais caro uma aposta nesta tecnologia.

A Figura 35 mostra os locais onde o investimento num sistema solar térmico com apoio elétrico pode ser mais barato ou dispendioso.

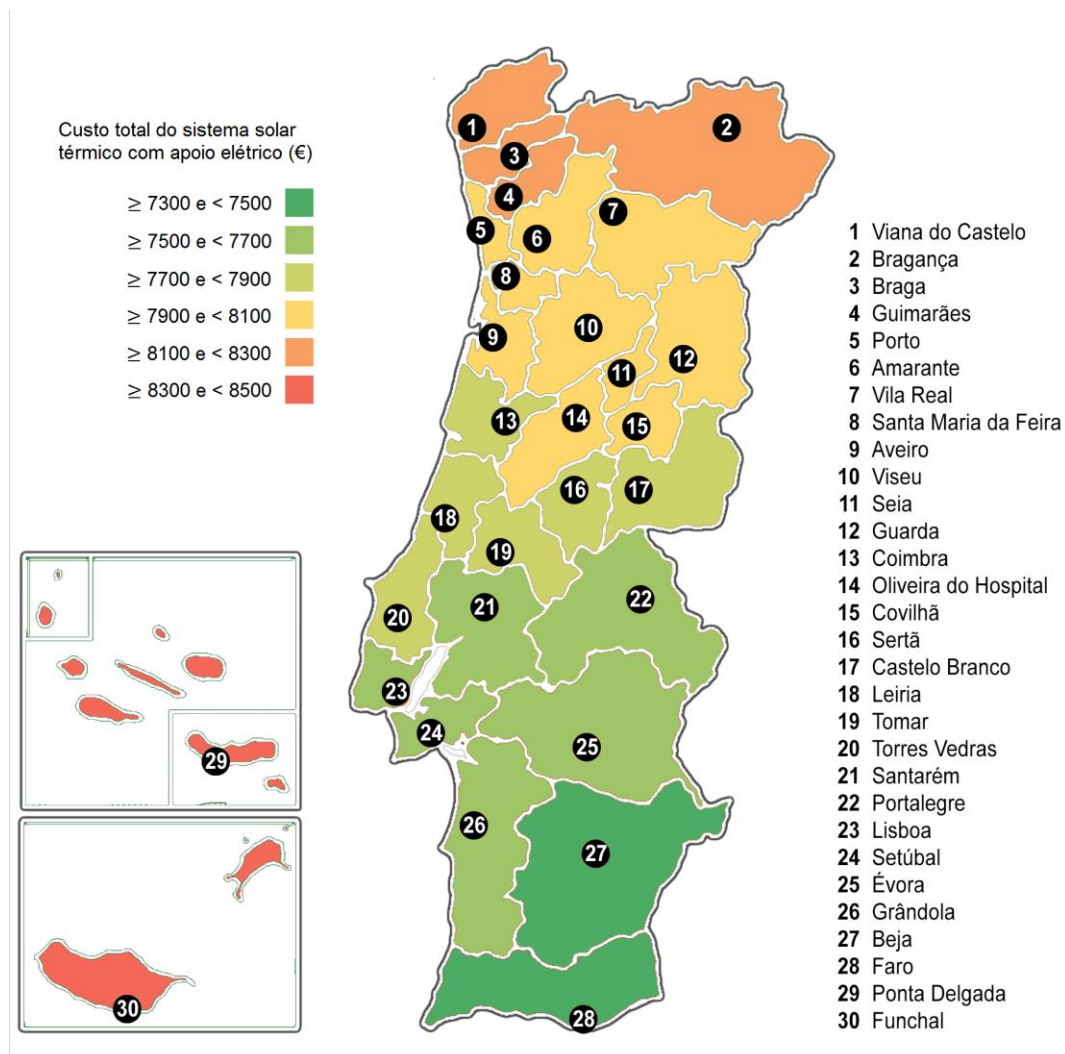


Figura 35: Custo total do sistema solar térmico com sistema de apoio elétrico

Para finalizar temos a bomba de calor que consegue os melhores valores na cidade de Ponta Delgada, seguida da cidade do Funchal, com 7132 € e 7168 €, encontrando-se os custos mais elevados associados à cidade de Bragança, 7763 €. Tal como tem vindo a acontecer os piores valores voltam a estar na região da beira alta e do interior norte, e as melhores regiões para este sistema são os arquipélagos, seguidos do sul de Portugal continental.

A distribuição dos valores alcançados para este sistema é apresentada na Figura 36.

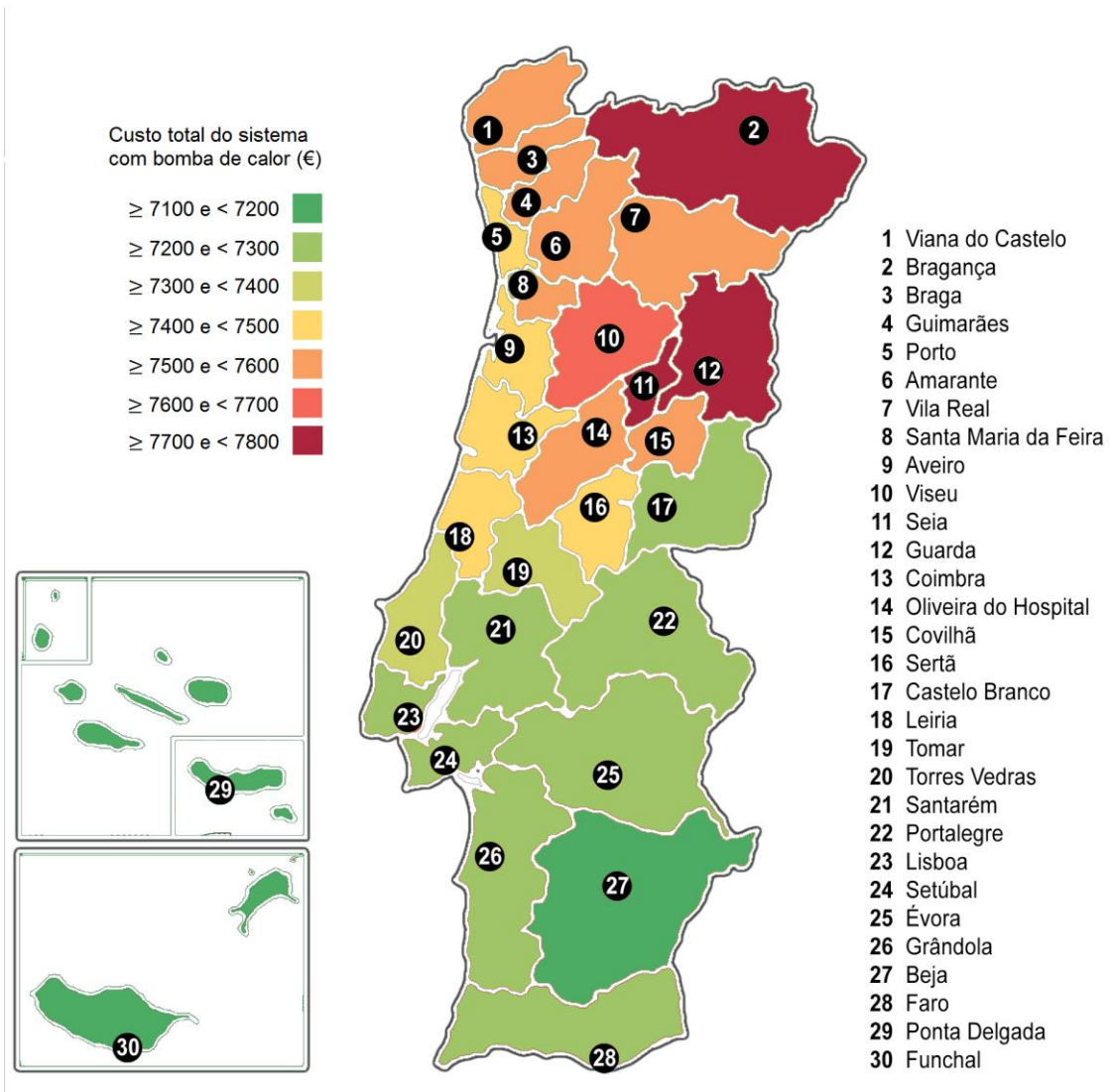


Figura 36: Custo total do sistema com bomba de calor

5. Conclusões

Este trabalho tinha como objetivo a comparação do desempenho de sistemas solares térmicos e de bombas de calor para preparação de água quente sanitária, considerando os mesmos perfis de extração. O estudo foi efetuado para trinta cidades de Portugal, permitindo deste modo uma melhor análise do comportamento destes sistemas.

Para o sistema solar térmico analisou-se a radiação solar incidente no coletor, a energia fornecida pelo sistema solar, a energia fornecida pelo sistema de apoio e por último calculou-se a fração solar. Como seria expectável as cidades situadas na região sul de Portugal continental são as que recebem mais radiação solar, permitindo assim que forneçam mais energia a partir do sistema solar. Tendo em atenção que a energia consumida diariamente é fixa, estas são as localidades em que o sistema de apoio fornece menos energia, permitindo a obtenção dos melhores valores no que respeita à fração solar. Ao invés, são as cidades dos arquipélagos da Madeira e dos Açores que exibem os piores valores da fração solar, devido à menor quantidade de radiação solar incidente durante o ano. Todas as cidades alcançaram uma fração solar superior aos 40 %, existindo oito cidades em que a fração solar é superior a 50 %.

Para a avaliação da bomba de calor foi calculado o fator de desempenho sazonal, a partir do método BIN modificado que utiliza a média horária da temperatura do ar como entrada no método de cálculo, e os melhores resultados foram conseguidos pelas cidades de Ponta Delgada e do Funchal, cidades com a temperatura média do ar mais elevada, enquanto a cidade de Bragança é a que apresenta o pior desempenho, cidade com a temperatura média do ar mais baixa. Focando-nos em Portugal continental, tal como sucede com o sistema solar térmico, são as localidades situadas na região sul que apresentam os valores mais elevados, com SPF entre 1.95 e 2.00.

No que diz respeito ao consumo de energia primária, consideraram-se três sistemas diferentes: sistema solar térmico com sistema de apoio elétrico, sistema solar térmico com sistema de apoio a gás e sistema com bomba de calor. O sistema que apresenta o menor consumo de energia primária é o sistema solar térmico com sistema de apoio a gás, em grande parte devido ao fato da eficiência na extração do gás natural ser muito superior à eficiência na produção e distribuição da eletricidade, 0.91 e 0.445, respetivamente. Relativamente aos dois sistemas que utilizam eletricidade, o sistema com bomba de calor apresenta um menor consumo energético que o sistema solar térmico com apoio elétrico, excetuando Faro. É de notar que a maior diferença nos valores do consumo de energia primária entre estes dois sistemas surge em Ponta Delgada e no Funchal, seguido da região norte, mas à medida que avançamos para a região sul, esta diferença vai diminuindo, até que na cidade de Faro o sistema solar térmico com apoio elétrico é mais vantajoso que o sistema com bomba de calor. Ainda sobre o consumo de energia primária, foi efetuado um cálculo de modo a prever qual o fator de desempenho sazonal que uma bomba de calor teria de ter para conseguir igualar o consumo de energia do sistema solar térmico com apoio a gás. O fator de desempenho sazonal tem de ser superior para as cidades onde o consumo energético por parte do sistema solar é inferior, ou seja nas cidades da região sul, por sua vez é nos arquipélagos da Madeira e dos Açores que a bomba de calor necessita de um desempenho inferior.

Foram também realizados cálculos económicos com vista a perceber melhor quais os custos inerentes a cada um dos três tipos de sistemas estudados para um intervalo temporal de 10 anos. Devido ao facto de o gás natural apresentar um preço bastante inferior ao da eletricidade é o sistema solar térmico com apoio a gás natural que exhibe o custo mais baixo, existindo neste caso uma diferença considerável para com os sistemas alternativos. De seguida surge o sistema com bomba de calor e como sistema mais dispendioso temos o sistema solar térmico com apoio elétrico. É novamente a região sul que apresenta os custos mais baixos para os sistemas solares enquanto para a bomba de calor é na Madeira, nos Açores, no Alentejo e no Algarve que estão os valores mais baixos.

É portanto a diferença entre o preço da eletricidade e do gás, que torna o sistema solar térmico com apoio a gás muito mais barato. No entanto, como se sabe o gás natural é um combustível de que o país

não dispõe e que tem de importar com todos os riscos inerentes, pelo que se optar por um dos sistemas que utiliza eletricidade, o sistema com bomba de calor é aquele que apresenta custos inferiores.

6. Referências

- Agência Portuguesa do Ambiente (APA). Relatório do Estado do Ambiente – REA 2013, Portugal.
- Água Quente Solar, Lisboa. Utilização de Coletores Solares para Aquecimento de Água no Setor Doméstico.
- Aiguasol, junho de 2008. INTRODUCCIÓN A TRNSYS – Curso de formación TRNSYS.
- ÇENGEL, Yunus A.- Termodinâmica. 5ª Edição: McGraw Hill, 2006.
- Decisão da Comissão 2013/114/EU, de 1 de março de 2013. Estabelece as orientações para os Estados-Membros no cálculo da energia renovável obtida a partir de bombas de calor de diferentes tecnologias, em conformidade com o artigo 5.º da Diretiva 2009/28/CE do Parlamento e do Conselho.
- Decreto-Lei n.º 118/2013, de 20 de agosto. Aprova o Sistema de Certificação Energética dos Edifícios, o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação e o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços, e transpõe a Diretiva n.º 2010/31/EU, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 19 de maio de 2010, relativa ao desempenho energético dos edifícios.
- Despacho n.º15793-F/2013. Procede à publicação dos parâmetros para o zonamento climático e respetivos dados.
- Diretiva 2009/28/CE do Parlamento Europeu e do Conselho, de 23 de abril de 2009. Relativa à promoção da utilização de energia proveniente de fontes renováveis que altera e subseqüentemente revoga as Diretivas 2001/77/CE e 2003/30/CE.
- Diretiva 2012/27/EU do Parlamento Europeu e do Conselho, de 25 de outubro de 2012. Relativa à eficiência energética, que altera as Diretivas 2009/125/CE e 2010/30/EU e revoga as Diretivas 2004/8/CE e 2006/32/CE.
- Elimar, F., Haller, M., Herkel, S., Ruschenburg, J., 2010. Systematic Classification of Combined Solar Thermal and Heat Pump Systems, EuroSun 2010 International Conference on Solar Heating, Cooling and Buildings, 28 September-1October 2010, Graz, Austria.
- EN 60379:2004. Methods for measuring the performance of electric storage water-heaters for household purposes.
- EN 12976:2006. Thermal solar systems and components – Factory made systems.
- EN 15316-4-2: 2008. Heating systems in buildings. Method for calculation of system energy requirements and system efficiencies. Part 4-2: Space heating generation systems, heat pump systems.
- EN 16147:2011. Heat pumps with electrically driven compressor – Testing and requirements for marking of domestic hot water units.
- EN 14825:2012. Air conditioners, liquid chilling packages and heat pumps, with electrically driven compressor, for space heating and cooling. Testing and rating at part load conditions and calculation of seasonal performance.
- ENERGIE: Energia Solar Termodinâmica. Catálogo Geral – Energia Solar Termodinâmica e Bombas de Calor.
- Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos. Proveitos Permitidos das Empresas Reguladas do Setor Elétrico em 2014, dezembro 2013.
- Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos. Preços de Referência no Mercado Liberalizado de Energia Elétrica e Gás Natural em Portugal Continental, 30 de Abril de 2014.
- ESTIF, de junho de 2014. Solar Thermal Markets in Europe – Trends and Market Statistics 2013.
- Facão, J., Carvalho, M. J., 2013. Solar Energy - New test methodologies to analyze direct expansion solar assisted heat pumps for domestic hot water.
- Facão, J.. Relatório Técnico, 2010. Combinação de bombas de calor com sistemas solares térmicos para a preparação de AQS e aquecimento/arrefecimento ambiente.
- ISO 9806:2013(E). Solar Energy – Solar thermal collectors – Test methods.
- Jakobs, Rainer, 2013. Research and developments in the European heat pump industry based on the European Heat Pump Summit 2013.
- Malenković, I., Eicher, S., Bony, J., 2012. Definition of Main System Boundaries and Performance Figures for Reporting on SHP Systems, Solar Heating & Cooling Program of International Energy Agency.

Mendes, João Farinha, 2011. Energia Solar Térmica, Ponto da situação e caminhos para 2020, PDF.

Ministério das Finanças, abril de 2013. Documento de Estratégia Orçamental (DEO), 2013-2017.

Portaria n.º239-A/2013, de 29 de novembro. Determina as competências da entidade gestora do Sistema de Certificação Energética dos Edifícios (SCE), regulamenta as atividades dos técnicos do SCE, estabelece as categorias de edifícios, para efeitos de certificação energética, bem como os tipos de pré certificados e certificados SCE e responsabilidade pela sua emissão, fixa as taxas de registo no SCE e estabelece os critérios de verificação de qualidade dos processos de certificação do SCE, bem como os elementos que deverão constar do relatório e da anotação no registo individual do Perito Qualificado (PQ).

Portaria n.º239-B/2013, de 29 de novembro. Define a metodologia de determinação da classe de desempenho energético para a tipologia de pré-certificados e certificados do Sistema de Certificação Energética dos Edifícios (SCE), bem como os requisitos de comportamento técnico e de eficiência dos sistemas técnicos dos edifícios sujeitos a grande intervenção.

Portaria n.º239-D/2013, de 2 de dezembro. Determina os requisitos de conceção relativos à qualidade térmica da envolvente e à eficiência dos sistemas técnicos dos edifícios novos, dos edifícios sujeitos a grande intervenção e dos edifícios existentes.

Regulamento Delegado (UE) N.º 812/2013 da Comissão, de 18 de fevereiro. Complementa a Diretiva 2010/30/EU do Parlamento Europeu e do Conselho no que respeita à rotulagem energética dos aquecedores de água, reservatórios de água quente e sistemas mistos de aquecedor de água e dispositivo solar.

Regulamento (UE) N.º814/2013 da Comissão, de 2 de agosto de 2013. Dá execução à Diretiva 2009/125/CE do Parlamento Europeu e do Conselho no que respeita aos requisitos de conceção ecológica aplicáveis aos aquecedores de água e reservatórios de água quente.

http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Batch_solar_thermal_collectorColour.jpg (data de consulta: maio de 2014)

<http://www.gorbiproducts.co.za/home/2010-solar-water-heater-swh-choices/> (data de consulta: maio de 2014)

<http://elergone.com/Servicos/SolarTermico/CirculacaoForcada> (data de consulta: maio de 2014)

<http://elergone.com/Servicos/SolarTermico/Termossifao> (data de consulta: maio de 2014)

<http://www.dgeg.pt> (data de consulta: julho de 2014)

<http://www.lneg.pt/iedt/projectos/370/> (data de consulta: junho de 2014)

<http://www.lneg.pt/servicos/328/2263/> (data de consulta: junho de 2014)

7. Anexos

7.1 Tabelas com os valores do SPF diário para todas as cidades

Tabela 25- Viana do Castelo

Temperatura	Frequência	SPF diário
5	1	1.4
6	6	1.4
7	7	1.5
8	13	1.5
9	21	1.6
10	31	1.6
11	35	1.7
12	35	1.7
13	21	1.8
14	22	1.8
15	18	1.9
16	13	1.9
17	16	2.0
18	23	2.0
19	7	2.1
20	15	2.1
21	23	2.2
22	28	2.2
23	18	2.3
24	10	2.3
25	2	2.4

Tabela 26- Bragança

Temperatura	Frequência	SPF diário
3	1	1.3
4	6	1.3
5	14	1.4
6	17	1.4
7	21	1.5
8	23	1.5
9	29	1.6
10	25	1.6

11	27	1.7
12	9	1.7
13	18	1.8
14	13	1.8
15	9	1.9
16	7	1.9
17	22	2.0
18	14	2.0
19	9	2.1
20	8	2.1
21	15	2.2
22	21	2.2
23	20	2.3
24	18	2.3
25	11	2.4
26	6	2.4
27	1	2.5
28	1	2.5

Tabela 27- Braga

Temperatura	Frequência	SPF diário
6	4	1.4
7	6	1.5
8	5	1.5
9	17	1.6
10	28	1.6
11	31	1.7
12	32	1.7
13	30	1.8
14	31	1.8
15	17	1.9
16	17	1.9
17	11	2.0
18	8	2.0
19	21	2.1
20	27	2.1
21	29	2.2
22	23	2.2

23	17	2.3
24	7	2.3
25	2	2.4
26	2	2.4

Tabela 28- Guimarães

Temperatura	Frequência	SPF diário
5	2	1.4
6	2	1.4
7	13	1.5
8	11	1.5
9	32	1.6
10	30	1.6
11	29	1.7
12	23	1.7
13	23	1.8
14	25	1.8
15	27	1.9
16	14	1.9
17	8	2.0
18	20	2.0
19	10	2.1
20	9	2.1
21	16	2.2
22	24	2.2
23	25	2.3
24	14	2.3
25	6	2.4
26	2	2.4

Tabela 29- Porto

Temperatura	Frequência	SPF diário
7	1	1.5
8	3	1.5
9	8	1.6
10	19	1.6
11	26	1.7

12	31	1.7
13	37	1.8
14	32	1.8
15	27	1.9
16	20	1.9
17	8	2.0
18	18	2.0
19	25	2.1
20	27	2.1
21	24	2.2
22	28	2.2
23	18	2.3
24	9	2.3
25	2	2.4
26	2	2.4

Tabela 30- Amarante

Temperatura	Frequência	SPF diário
3	1	1.3
4	1	1.3
5	2	1.4
6	3	1.4
7	7	1.5
8	15	1.5
9	25	1.6
10	27	1.6
11	21	1.7
12	28	1.7
13	24	1.8
14	25	1.8
15	19	1.9
16	17	1.9
17	17	2.0
18	15	2.0
19	9	2.1
20	15	2.1
21	19	2.2
22	16	2.2
23	24	2.3

24	27	2.3
25	6	2.4
26	2	2.4

Tabela 31- Vila Real

Temperatura	Frequência	SPF diário
4	1	1.3
5	10	1.4
6	13	1.4
7	22	1.5
8	13	1.5
9	18	1.6
10	23	1.6
11	23	1.7
12	20	1.7
13	19	1.8
14	16	1.8
15	17	1.9
16	18	1.9
17	15	2.0
18	13	2.0
19	11	2.1
20	7	2.1
21	15	2.2
22	14	2.2
23	17	2.3
24	25	2.3
25	12	2.4
26	10	2.4
27	8	2.5
28	5	2.5

Tabela 32- Santa Maria da Feira

Temperatura	Frequência	SPF diário
6	1	1.4
7	7	1.5
8	17	1.5

9	23	1.6
10	26	1.6
11	28	1.7
12	25	1.7
13	30	1.8
14	23	1.8
15	16	1.9
16	23	1.9
17	17	2.0
18	11	2.0
19	21	2.1
20	22	2.1
21	22	2.2
22	23	2.2
23	18	2.3
24	11	2.3
25	1	2.4

Tabela 33- Aveiro

Temperatura	Frequência	SPF diário
6	1	1.4
7	3	1.5
8	5	1.5
9	18	1.6
10	20	1.6
11	26	1.7
12	26	1.7
13	25	1.8
14	27	1.8
15	35	1.9
16	21	1.9
17	10	2.0
18	19	2.0
19	26	2.1
20	20	2.1
21	25	2.2
22	28	2.2
23	21	2.3
24	8	2.3

25	1	2.4
----	---	-----

Tabela 34- Coimbra

Temperatura	Frequência	SPF diário
7	1	1.5
8	5	1.5
9	18	1.6
10	8	1.6
11	23	1.7
12	30	1.7
13	46	1.8
14	28	1.8
15	28	1.9
16	15	1.9
17	15	2.0
18	17	2.0
19	17	2.1
20	27	2.1
21	29	2.2
22	25	2.2
23	21	2.3
24	8	2.3
25	4	2.4

Tabela 35- Guarda

Temperatura	Frequência	SPF diário
3	1	1.3
4	2	1.3
5	12	1.4
6	14	1.4
7	23	1.5
8	17	1.5
9	20	1.6
10	27	1.6
11	30	1.7
12	29	1.7
13	19	1.8

14	9	1.8
15	14	1.9
16	12	1.9
17	6	2.0
18	10	2.0
19	11	2.1
20	11	2.1
21	17	2.2
22	18	2.2
23	23	2.3
24	19	2.3
25	15	2.4
26	4	2.4
27	2	2.5

Tabela 36- Castelo Branco

Temperatura	Frequência	SPF diário
7	6	1.5
8	12	1.5
9	14	1.6
10	20	1.6
11	28	1.7
12	15	1.7
13	18	1.8
14	22	1.8
15	21	1.9
16	25	1.9
17	21	2.0
18	12	2.0
19	9	2.1
20	6	2.1
21	6	2.2
22	13	2.2
23	12	2.3
24	20	2.3
25	17	2.4
26	14	2.4
27	22	2.5
28	20	2.5

29	9	2.6
30	3	2.6

Tabela 37- Covilhã

Temperatura	Frequência	SPF diário
5	1	1.4
6	6	1.4
7	14	1.5
8	28	1.5
9	25	1.6
10	28	1.6
11	23	1.7
12	19	1.7
13	25	1.8
14	18	1.8
15	16	1.9
16	10	1.9
17	8	2.0
18	19	2.0
19	18	2.1
20	10	2.1
21	7	2.2
22	9	2.2
23	14	2.3
24	25	2.3
25	29	2.4
26	10	2.4
27	3	2.5

Tabela 38- Seia

Temperatura	Frequência	SPF diário
4	2	1.3
5	5	1.4
6	12	1.4
7	17	1.5
8	28	1.5
9	22	1.6

10	29	1.6
11	30	1.7
12	22	1.7
13	16	1.8
14	18	1.8
15	17	1.9
16	13	1.9
17	14	2.0
18	14	2.0
19	9	2.1
20	15	2.1
21	20	2.2
22	18	2.2
23	14	2.3
24	9	2.3
25	14	2.4
26	5	2.4
27	2	2.5

Tabela 39- Viseu

Temperatura	Frequência	SPF diário
4	1	1.3
5	2	1.4
6	5	1.4
7	10	1.5
8	20	1.5
9	27	1.6
10	28	1.6
11	28	1.7
12	29	1.7
13	19	1.8
14	19	1.8
15	23	1.9
16	19	1.9
17	11	2.0
18	6	2.0
19	12	2.1
20	18	2.1
21	18	2.2

22	19	2.2
23	25	2.3
24	19	2.3
25	6	2.4
26	1	2.4

Tabela 40- Oliveira do Hospital

Temperatura	Frequência	SPF diário
6	1	1.4
7	12	1.5
8	16	1.5
9	17	1.6
10	26	1.6
11	27	1.7
12	36	1.7
13	29	1.8
14	19	1.8
15	11	1.9
16	18	1.9
17	18	2.0
18	18	2.0
19	12	2.1
20	17	2.1
21	17	2.2
22	19	2.2
23	25	2.3
24	17	2.3
25	10	2.4

Tabela 41- Sertã

Temperatura	Frequência	SPF diário
6	1	1.4
7	5	1.5
8	11	1.5
9	22	1.6
10	29	1.6
11	37	1.7

12	31	1.7
13	15	1.8
14	18	1.8
15	23	1.9
16	21	1.9
17	10	2.0
18	17	2.0
19	16	2.1
20	13	2.1
21	8	2.2
22	13	2.2
23	12	2.3
24	20	2.3
25	26	2.4
26	13	2.4
27	4	2.5

Tabela 42- Leiria

Temperatura	Frequência	SPF diário
8	5	1.5
9	8	1.6
10	21	1.6
11	40	1.7
12	30	1.7
13	35	1.8
14	24	1.8
15	21	1.9
16	27	1.9
17	24	2.0
18	18	2.0
19	17	2.1
20	21	2.1
21	33	2.2
22	22	2.2
23	12	2.3
24	3	2.3
25	4	2.4

Tabela 43- Torres Vedras

Temperatura	Frequência	SPF diário
6	1	1.4
7	1	1.5
8	3	1.5
9	8	1.6
10	11	1.6
11	21	1.7
12	33	1.7
13	34	1.8
14	27	1.8
15	23	1.9
16	21	1.9
17	29	2.0
18	28	2.0
19	17	2.1
20	14	2.1
21	25	2.2
22	32	2.2
23	29	2.3
24	6	2.3
25	2	2.4

Tabela 44- Tomar

Temperatura	Frequência	SPF diário
7	2	1.5
8	8	1.5
9	17	1.6
10	15	1.6
11	29	1.7
12	29	1.7
13	31	1.8
14	26	1.8
15	25	1.9
16	10	1.9
17	16	2.0
18	28	2.0
19	14	2.1
20	7	2.1

21	11	2.2
22	20	2.2
23	30	2.3
24	24	2.3
25	17	2.4
26	6	2.4

Tabela 45- Santarém

Temperatura	Frequência	SPF diário
8	2	1.5
9	8	1.6
10	13	1.6
11	22	1.7
12	28	1.7
13	28	1.8
14	26	1.8
15	26	1.9
16	24	1.9
17	18	2.0
18	15	2.0
19	21	2.1
20	12	2.1
21	12	2.2
22	20	2.2
23	24	2.3
24	28	2.3
25	19	2.4
26	12	2.4
27	4	2.5
28	3	2.5

Tabela 46- Lisboa

Temperatura	Frequência	SPF diário
7	2	1.5
8	3	1.5
9	7	1.6
10	10	1.6

11	18	1.7
12	22	1.7
13	28	1.8
14	31	1.8
15	28	1.9
16	21	1.9
17	20	2.0
18	22	2.0
19	23	2.1
20	28	2.1
21	26	2.2
22	24	2.2
23	16	2.3
24	11	2.3
25	11	2.4
26	4	2.4
27	6	2.5
28	2	2.5
29	1	2.6
30	1	2.6

Tabela 47- Setúbal

Temperatura	Frequência	SPF diário
7	1	1.5
8	2	1.5
9	6	1.6
10	15	1.6
11	12	1.7
12	11	1.7
13	31	1.8
14	40	1.8
15	27	1.9
16	30	1.9
17	22	2.0
18	13	2.0
19	21	2.1
20	22	2.1
21	15	2.2

22	15	2.2
23	15	2.3
24	21	2.3
25	27	2.4
26	12	2.4
27	5	2.5
28	2	2.5

Tabela 48- Portalegre

Temperatura	Frequência	SPF diário
7	1	1.5
8	5	1.5
9	12	1.6
10	22	1.6
11	18	1.7
12	30	1.7
13	24	1.8
14	26	1.8
15	25	1.9
16	19	1.9
17	18	2.0
18	12	2.0
19	21	2.1
20	14	2.1
21	8	2.2
22	12	2.2
23	9	2.3
24	15	2.3
25	17	2.4
26	17	2.4
27	21	2.5
28	6	2.5
29	9	2.6
30	2	2.6
31	2	2.7

Tabela 49- Évora

Temperatura	Frequência	SPF diário
8	6	1.5
9	7	1.6
10	18	1.6
11	20	1.7
12	23	1.7
13	22	1.8
14	33	1.8
15	28	1.9
16	26	1.9
17	8	2.0
18	11	2.0
19	17	2.1
20	19	2.1
21	15	2.2
22	8	2.2
23	16	2.3
24	19	2.3
25	16	2.4
26	21	2.4
27	22	2.5
28	9	2.5
29	1	2.6

Tabela 50- Grândola

Temperatura	Frequência	SPF diário
8	1	1.5
9	6	1.6
10	9	1.6
11	18	1.7
12	27	1.7
13	41	1.8
14	23	1.8
15	27	1.9
16	16	1.9
17	23	2.0
18	28	2.0
19	30	2.1
20	22	2.1

21	13	2.2
22	12	2.2
23	14	2.3
24	21	2.3
25	25	2.4
26	7	2.4
27	1	2.5
28	1	2.5

Tabela 51- Beja

Temperatura	Frequência	SPF diário
7	1	1.5
8	1	1.5
9	6	1.6
10	13	1.6
11	25	1.7
12	18	1.7
13	25	1.8
14	31	1.8
15	22	1.9
16	16	1.9
17	26	2.0
18	24	2.0
19	11	2.1
20	9	2.1
21	11	2.2
22	17	2.2
23	13	2.3
24	18	2.3
25	25	2.4
26	17	2.4
27	15	2.5
28	16	2.5
29	3	2.6
30	2	2.6

Tabela 52- Faro

Temperatura	Frequência	SPF diário
8	1	1.5
9	2	1.6
10	8	1.6
11	17	1.7
12	30	1.7
13	26	1.8
14	24	1.8
15	27	1.9
16	27	1.9
17	30	2.0
18	23	2.0
19	13	2.1
20	19	2.1
21	14	2.2
22	18	2.2
23	20	2.3
24	20	2.3
25	17	2.4
26	17	2.4
27	9	2.5
28	3	2.5

Tabela 53- Ponta Delgada

Temperatura	Frequência	SPF diário
11	2	1.7
12	5	1.7
13	12	1.8
14	26	1.8
15	43	1.9
16	47	1.9
17	43	2.0
18	21	2.0
19	33	2.1
20	33	2.1
21	21	2.2
22	25	2.2

23	27	2.3
24	20	2.3
25	4	2.4
26	2	2.4
27	1	2.5

Tabela 54- Funchal

Temperatura	Frequência	SPF diário
11	1	1.7
12	3	1.7
13	14	1.8
14	28	1.8
15	38	1.9
16	51	1.9
17	51	2.0
18	26	2.0
19	39	2.1
20	33	2.1
21	28	2.2
22	26	2.2
23	20	2.3
24	6	2.3
25	1	2.4