

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



Ciências
ULisboa

**Desenvolvimento de aplicação informática para cálculo de
desempenho energético de bombas de calor assistidas por
energia solar**

Mestrado Integrado em Engenharia da Energia e do Ambiente

Dissertação

Artur Filipe Felizardo Vilela

2015

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



Desenvolvimento de aplicação informática para cálculo de desempenho energético de bombas de calor assistidas por energia solar

**Mestrado em Engenharia da Energia e do Ambiente
Dissertação**

Artur Filipe Felizardo Vilela

Dissertação orientada por:

Maria João Petronilo de Carvalho (FCUL)

Jorge Manuel Resende Vieira Facão (LNEG)

2015

Agradecimentos

Em primeiro lugar, agradeço à Doutora Maria João de Carvalho pela oportunidade de realizar esta dissertação, por me abrir uma porta quando outra se fechou.

Ao Doutor Jorge Facão agradeço por toda a ajuda, disponibilidade e paciência para as minhas dúvidas, mantendo sempre este trabalho no bom caminho e encontrando soluções onde elas pareciam não existir.

À minha família, aos meus pais, agradeço por tudo o que me proporcionaram, pelo apoio que me deram e nunca me negaram, por torcerem por mim sem limites.

À Sara, agradeço por toda a motivação que me deu, por me mostrar que é possível melhorar sempre, mesmo quando não julgo ser capaz. O seu apoio foi imprescindível e o seu contributo inqualificável.

À minha irmã, ao Manuel, à Cristiana e ao Cristiano agradeço pelos conselhos que me deram e pela disponibilidade.

Resumo

No presente trabalho foi desenvolvida uma aplicação informática em Visual Basic, que permite ao utilizador conhecer o desempenho energético de três bombas de calor assistidas por energia solar para preparação de água quente sanitária, para qualquer município do país, simulando o seu funcionamento anual. Os cálculos realizados pela aplicação baseiam-se no modelo de funcionamento das bombas de calor desenvolvido no artigo “*New test methodologies to analyse direct expansion solar assisted heat pumps for domestic hot water*” (Facão & Carvalho, 2014) e tem como fonte de dados climáticos o *software* Climas SCE, disponibilizado pelo Laboratório Nacional de Energia e Geologia (LNEG). O modelo energético do depósito usado na aplicação foi desenvolvido durante este trabalho, tendo como base outros modelos já existentes. Os resultados obtidos foram comparados com resultados de ensaios experimentais elaborados para os mesmos sistemas, usando os mesmos perfis de extração, para trinta localidades escolhidas a partir da Nomenclatura das Unidades Territoriais para Fins Estatísticos (NUTS III), analisando o fator de desempenho sazonal (SPF) anual e mensal.

A diferença entre os valores do SPF anual obtidos nesta aplicação e os valores obtidos nos ensaios experimentais para os três sistemas variou entre 0% e 1,8%. Os valores obtidos na aplicação demonstram ainda uma diminuição da amplitude entre o mês com o melhor e o pior SPF de 3,7% a 45,1%.

Palavras-Chave: bomba de calor, AQS, SPF, simulação de sistemas, Visual Basic.

Abstract

In the present work was developed a computer application in Visual Basic, which enables the user to acknowledge the energy performance of three heat pumps assisted by solar energy for domestic hot water, to every city in Portugal, simulating its annual operations. The calculations performed by the application are based upon the model of heat pumps developed in the article "New test methodologies to analyze direct expansion solar assisted heat pumps for domestic hot water" (Facão & Carvalho, 2014). The weather data is provided by Clima SCE software, developed by the National Energy and Geology Laboratory. The energy model of the storage tank used in the application was developed during this work, based on other existing models. The results were compared with test results for the same systems using the same extraction profiles for thirty locations chosen from the Nomenclature of Territorial Units for Statistics (NUTS III) by analyzing the annual and monthly SPF.

The difference between the values of the annual SPF obtained by experimental method and the values obtained for the application ranged from 0% to 1.8% for the three systems. The values obtained in the application show a decrease of the amplitude between the month with best and worst SPF of 3.7% to 45.1%.

Keywords: heat pump, hot water, SPF, simulation systems, Visual Basic.

Índice

Agradecimentos.....	i
Resumo.....	ii
Abstract	ii
Índice de Figuras, Esquemas, Gráficos e Diagramas	vi
Índice de Tabelas.....	vii
Nomenclatura	viii
Acrónimos, Abreviaturas e Siglas.....	x
Capítulo 1 – Introdução.....	1
1.1 Enquadramento	1
1.2. Projetos de Investigação.....	3
1.3. Motivação e Objetivos	4
Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica	5
2.1. Energia Solar.....	5
2.2. Bombas de Calor	7
2.2.1. Bomba de Calor de Expansão Direta Assistida por Energia Solar.....	12
2.3. Visual Basic	15
2.4. Métodos Numéricos	15
2.4.1. Sistema de Equações Lineares	16
2.4.2. Sistema de Equações Não-Lineares	17
2.5. Regulamentação e Legislação	20
2.5.1. Regulamento (UE) N.º 814/2013	20
2.5.2. EN 16147:2011	23
2.5.3. Decisão da CE: 2013/114/EU	24
Capítulo 3 – Modelação do Sistema.....	26
3.1. Componentes da Bomba de Calor.....	26
3.2. Clima e Localidades	28

3.3. Caracterização de Consumos	30
3.4. Modelo do Depósito.....	31
3.5. Modelo da Bomba de Calor	35
3.6. Funcionamento da Aplicação	38
3.6.1. Sub-rotinas e <i>Namespace</i>	38
3.6.2. Visão Geral da Aplicação.....	40
Capítulo 4 – Resultados	44
Capítulo 5 – Conclusão	57
Referências Bibliográficas	59
Anexos.....	62
Anexo Ia – Ciclo de Consumo S (EN 16147:2011)	63
Anexo Ib – Ciclo de Consumo M (EN 16147:2011).....	64
Anexo Ic – Ciclo de Consumo L (EN 16147:2011).....	65
Anexo Id – Ciclo de Consumo XL (EN 16147:2011).....	66

Índice de Figuras, Esquemas, Gráficos e Diagramas

Figura 1 – Evolução do consumo de energia no sector doméstico (tep) por tipo de fonte (1989-2009) [7].....	2
Figura 2 – Funcionamento de uma bomba de calor (adaptado [17]).....	9
Figura 3 – Nomenclatura representativa do funcionamento de uma bomba de calor [20].....	11
Figura 4 – Eliminação de Gauss-Jordan [28]	16
Figura 5 – Painel solar termodinâmico	27
Figura 6 – Nomenclatura representativa do funcionamento da DX-SAHP usada [23].....	28
Figura 7 – Seleção da simulação a realizar pela aplicação.....	40
Figura 8 – Resultado da simulação (exemplo)	42
Figura 9 – Diferença de amplitude entre os meses como maior e menor SPF (Sistema I)	46
Figura 10 – Diferença entre os valores do SPF anual (Sistema I).....	48
Figura 11 – Diferença de amplitude entre os meses como maior e menor SPF (Sistema II)	50
Figura 12 – Diferença entre os valores do SPF anual (Sistema II)	52
Figura 13 – Diferença de amplitude entre os meses como maior e menor SPF (Sistema III).....	54
Figura 14 – Diferença entre os valores do SPF anual (Sistema III)	56
Esquema 1 – Princípio de funcionamento de uma bomba de calor (adaptado [17]).....	7
Esquema 2 – Funcionamento de uma bomba de calor assistida por energia solar [20]	11
Esquema 3 – Componentes de uma bomba de calor assistida por energia solar [23]	13
Esquema 4 – Representação do funcionamento da DX-SAHP usada [23]	28
Esquema 5 – Trocas de energia entre camadas do depósito.....	33
Gráfico 1 – Temperatura-Entropia (A) e Pressão-Entalpia (B) do ciclo termodinâmico da bomba de calor	10
Gráfico 2 – SPF mensal calculado pela aplicação para o sistema I (SPF a amarelo e Eren a azul). A – Ponta Delgada; B – Viseu; C – Beja; D – Funchal.....	45
Gráfico 3 – SPF mensal calculado pela aplicação para o sistema II (SPF a amarelo e Eren a azul). A – Ponta Delgada; B – Viseu; C – Beja; D – Funchal.....	49
Gráfico 4 – SPF mensal calculado pela aplicação para o sistema III (SPF a amarelo e Eren a azul). A – Ponta Delgada; B – Viseu; C – Beja; D – Funchal.....	53
Diagrama 1 – Funcionamento geral da aplicação	42
Diagrama 2 – Sub-rotina NosDep	43

Índice de Tabelas

Tabela 1 – Abreviaturas utilizadas para transmitir informação do sistema através de um código de letras (adaptado [20]).....	11
Tabela 2 – Eficiência energética para os diferentes perfis de carga [32]	21
Tabela 3 – Requisitos de água misturada a 40°C [32]	21
Tabela 4 – Eficiência energética dos aquecedores de água em 2017 [32]	22
Tabela 5 – Eficiência energética do aquecimento de água em 2018 [32]	22
Tabela 6 – Valores de k [32]	23
Tabela 7 – Condições de teste para todos os sistemas [33].....	23
Tabela 8 – Fluxos dos tipos de extração [33].....	24
Tabela 9 – Características do painel solar termodinâmico	26
Tabela 10 – Características dos depósitos de armazenamento	27
Tabela 11 – NUTS III e localidades escolhidas	30
Tabela 12 – Valores das constantes das equações (50) e (51).....	38
Tabela 13 – Resultados da simulação (Sistema I).....	47
Tabela 14 – Resultados da simulação (Sistema II).....	51
Tabela 15 – Resultados da simulação (Sistema III)	55

Nomenclatura

d	Dias Julianos
COP	Coefficiente de performance
C_p	Calor específico da água (J/(kg.k))
$E_{ar,ag}$	Energia elétrica consumida pelo compressor (J)
E_L	Irradiância de grande comprimento de onda (W/m ²)
HR	Humidade relativa (%)
HRA	Ângulo horário (°)
IAM	Modificador de ângulo incidente
I_{dif}	Irradiância difusa horizontal (W/m ²)
I_{dir}	Irradiância direta horizontal (W/m ²)
$I_{dir\beta}$	Irradiância direta no plano inclinado (W/m ²)
I_g	Irradiância global horizontal (W/m ²)
$I_{g\beta}$	Irradiância global no plano inclinado (W/m ²)
LST	Hora solar local
LT	Hora local
\dot{m}_{ent}	Fluxo de água que entra pelo fundo do nó (kg/s)
$m_{nó}$	Massa de água do nó (kg)
\dot{m}_{sai}	Fluxo de água que sai pelo topo do nó (kg/s)
P_s	Pressão de saturação (Pa)
P_{stdy}	Potência da bomba de calor em <i>standby</i> (kW)
$Q_{ag,BC}$	Energia útil para aquecimento de água sanitária (J)
$Q_{ar,BC}$	Energia útil para aquecimento ou arrefecimento de espaço interior (J)

\dot{Q}_{aux}	Calor fornecido pela resistência da bomba de calor (W)
\dot{Q}_{BC}	Calor fornecido pela bomba de calor (W)
\dot{Q}_{calor}	Calor perdido pelo depósito (W)
\dot{Q}_{cond}	Calor do condensador (W)
Q_{cor}	Fator de correção ambiente (kWh)
\dot{Q}_{evap}	Calor do evaporador (W)
Q_{ele}	Consumo diário de eletricidade (kWh)
Q_{fuel}	Consumo diário de combustível (kWh)
Q_{ref}	Energia de referência (kWh)
SCF	<i>Smart Control Factor</i>
$SCOP_{net}$	Fator de desempenho sazonal para bombas de calor elétricas
SPF	Fator sazonal de desempenho
T_{amb}	Temperatura ambiente (°C)
T_{ag}	Temperatura da água que entra no depósito (°C)
T_c	Temperatura do condensador (°C)
T_e	Temperatura do evaporador (°C)
T_{ent}	Temperatura da água que entra no fundo do nó (°C)
$T_{nó}$	Temperatura da água do nó (°C)
T_{or}	Temperatura de orvalho (°C)
T_{sai}	Temperatura da água que sai no topo do nó (°C)
UA_{comp}	Coefficiente de perdas térmicas do compressor (W/K)
U_{dep}	Condutividade térmica do depósito (W/(K.m ²))
W_{aux}	Energia elétrica consumida pelo sistema de apoio (J)

W_{sby}	Energia elétrica consumida em <i>standby</i> (J)
u_{vento}	Velocidade do vento (m/s)
\dot{W}_{comp}	Calor do compressor (W)
α	Altura solar (°)
β	Inclinação do painel solar termodinâmico (°)
γ	Ângulo azimutal (°)
δ	Declinação solar (°)
ΔT	Diferença de temperaturas (°C)
ε_s	Emissividade do céu
ζ	Ângulo zenital (°)
η	Rendimento
η_{wh}	Rendimento do aquecimento de água por aquecedores
θ_i	Ângulo de incidência (°)
σ	Constante de Stefan-Boltzmann (W/(m ² .K ⁴))
φ	Latitude (°)

Acrónimos, Abreviaturas e Siglas

AQS	Água quente sanitária
BC	Bomba de calor
CC	Coefficiente de conversão
CE	Comissão Europeia
DGEG	Direção Geral de Energia e Geologia
DL	Decreto-Lei
DX-SAHP	<i>Direct expansion solar assisted heat pump</i>

EN	Norma Europeia
ESTIF	<i>European Solar Thermal Industry Federation</i>
ESTTP	<i>European Solar Thermal Technology Platform</i>
GUI	Interface gráfica do utilizador
HP	Bomba de calor
IEA	<i>International Energy Agency</i>
LES	Laboratório de Energia Solar
NUTS	Nomenclatura das Unidades Territoriais para Fins Estatísticos
S	Coletor solar
SAHP	Bomba de calor assistida a energia solar
SCE	Sistema de Certificação Energética dos Edifícios
SHP	Bomba de calor solar
UE	União Europeia

Capítulo 1 – Introdução

1.1 Enquadramento

O domínio da energia condicionou a evolução do Homem desde muito cedo, primeiro com a manipulação do fogo e, mais tarde, com a invenção de moinhos e velas de embarcações. Mas foi a partir da criação de máquinas a vapor, e consequente revolução industrial, que as sociedades começaram a desenvolver-se a um ritmo nunca antes visto e a adquirir a sua forma atual. Devido à sua inegável importância, a energia tornou-se um dos principais motivos de conflito entre nações, tendo alimentado duas grandes guerras. Embora hoje o panorama europeu seja outro, a Europa continua a ser confrontada com diversos problemas de ordem energética, como: o aumento da dependência das importações energéticas e os preços elevados e voláteis da energia; a crescente procura de energia a nível global; a falta de segurança que afeta tanto os países produtores como distribuidores; as crescentes ameaças decorrentes das alterações climáticas e a necessidade de uma maior transparência, integração e interligação dos mercados energéticos [1].

De forma a resolver estes problemas, a Europa tem vindo a procurar alternativas sustentáveis, com recurso a fontes de energia renovável em alternativa aos combustíveis fósseis, contribuindo assim para a redução das emissões de gases com efeito de estufa, a diversificação do aprovisionamento energético e a redução da dependência em relação a mercados de combustíveis instáveis, em particular os do petróleo e do gás. A União Europeia (UE) tornou-se desta forma líder no que respeita a tecnologias energéticas renováveis, estimando-se que atualmente empregue cerca de 1,2 milhões de pessoas nesta indústria. Nos últimos anos observou-se, inclusivamente, um aumento da promoção das energias renováveis decorrente das alterações favoráveis que ocorreram na legislação da UE. Os últimos dados disponíveis provenientes do Eurostat indicam que, em 2012, 14% do consumo de energia na UE-28 foi produzido com recurso a energias renováveis [2].

Relativamente à procura total de calor, em 2013 mais de 10% foi satisfeita por energia renovável. A maior parte deveu-se à utilização de bioenergia (mais comum no norte da Europa), embora os sistemas solares térmicos e sistemas geotérmicos tenham cada vez um papel mais relevante, à medida que se tornam mais competitivos em vários mercados. Isto é tido em conta pela Federação Europeia da Indústria Solar Térmica (ESTIF), que estima que para 2020 a procura de calor satisfeita por energia renovável seja de 21% [3] [4].

No caso de Portugal, é notório a importância que a energia tem na balança económica do país. Dados de 2013 mostram que, dos 15,4 Mtep de energia consumida, 11 foram importados. Esta dependência espelha-se também no saldo importador de produtos energéticos, tendo sido contabilizados cerca de 6,2 mil milhões de euros, que perfazem 20,1% do total do saldo importador de mercadorias desse ano [5] [6].

Relativamente ao consumo de energia no setor doméstico, dados de 2009 revelam que a eletricidade foi a principal fonte (representando 38,1% do consumo total), seguida pelas lenhas (biomassa e carvão vegetal) com 36,3%, o GPL com 16,3%, o gás natural (8,3%) e, por fim, o solar térmico (0,8%) e os produtos de petróleo (0,3%) (**Figura 1**) [7].

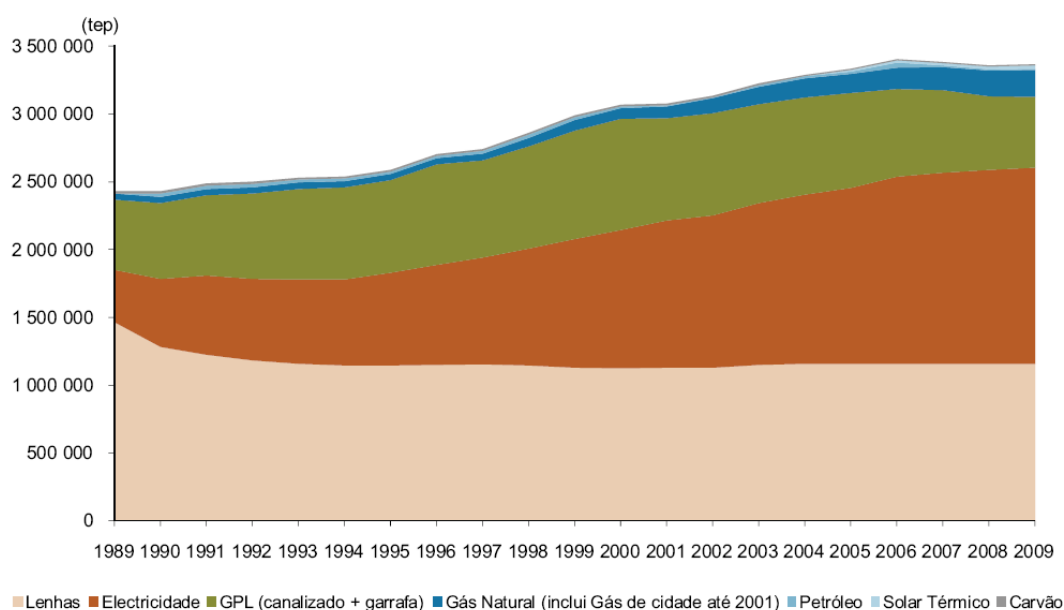


Figura 1 – Evolução do consumo de energia no sector doméstico (tep) por tipo de fonte (1989-2009) [7]

No que diz respeito a bombas de calor, em 2009 verificou-se que num total de mais de 450 mil equipamentos, a esmagadora maioria era do tipo Ar-Ar (93%), sendo que, até 2010, 55% dos equipamentos haviam sido instalados nos últimos quatro anos, demonstrando um claro crescimento de mercado [7].

No âmbito da energia solar, foram instalados em Portugal mais de 50 mil m² de novos coletores solares térmicos, em 2013. Contudo, registou-se uma variação negativa de 37% relativamente a 2012, o que poderá hipotecar os objetivos oficiais do país para 2020 (2,2 milhões de m²) uma vez que a área total instalada em Portugal em 2013 era de um milhão de m². Por outro lado, a indústria prevê uma estagnação ou um crescimento na instalação de novos coletores, tendo em conta as regras para os edifícios em vigor desde dezembro de 2013 (Decreto-Lei nº 118/2013)

que obrigam os edifícios de serviços, novos ou em caso de reabilitação, a produzir água quente sanitária (AQS) através de energia solar térmica ou outros métodos renováveis, como as bombas de calor solares ou geotérmicas [8].

1.2. Projetos de Investigação

A UE encara o setor da energia com extrema importância, não só pelo peso económico que este acarreta mas também pela sua importância ambiental e social. Como tal, em conjunto com parceiros privados e outras instituições internacionais, tem apostado em programas de investigação em tecnologias de várias áreas deste setor:

O programa *Horizon 2020* (Programa-Quadro Comunitário de Investigação & Inovação), a decorrer desde 2014 e até 2020, é o maior programa de apoio à investigação alguma vez projetado pela Comunidade Europeia, com um orçamento global de 77 mil milhões de euros. Os fundos acautelados para o setor da energia perfazem um total de 5,9 milhões de euros, sendo que 20% são investidos pela UE, 20% pelos seus Estados-membros e os restantes 60% são investidos pela indústria europeia. Os objetivos são: inovar, desenvolver energia limpa, segura e eficiente, e promover o desenvolvimento sustentável [1] [9].

A *Renewable Heating & Cooling Platform* começou em 2005, na Plataforma Europeia de Tecnologia Solar Térmica (ESTTP), e foca-se no desenvolvimento de tecnologias de energia e de infraestruturas que aumentem a produção de energia térmica a partir de uma fonte de energia renovável. Tem como objetivo permitir a viabilidade de exploração dessa fonte e/ou um maior rendimento do sistema. O armazenamento de energia térmica, as bombas de calor e os sistemas híbridos são algumas das tecnologias investigadas [10] [11].

A Agência Internacional de Energia (IEA), através do programa *Solar Heating & Cooling*, executou entre 2010 e 2014 a *Task 44*, que se focou no estudo de sistemas de AQS e aquecimento ambiente usando bombas de calor e coletores solares térmicos como principais componentes. Estudaram-se as soluções existentes no mercado e procuraram-se soluções alternativas, através de estudos laboratoriais, simulações e modelações. Outro dos objetivos passou pela divulgação do setor e produção de medidas de apoio ao mercado, tendo o Laboratório Nacional de Energia e Geologia (LNEG) sido um dos colaboradores deste projeto [12].

1.3. Motivação e Objetivos

A legislação portuguesa (DL n.º 118/2013) obriga ao uso de sistemas solares térmicos na preparação de AQS em novos edifícios. Em alternativa, podem ser usados outros sistemas de aproveitamento de energias renováveis, contando que assegurem, uma base anual, energia equivalente à do solar térmico. De acordo com a Diretiva Europeia das energias renováveis, as bombas de calor são consideradas equipamentos que captam energia renovável desde que o seu desempenho, caracterizado pelo fator de desempenho sazonal (SPF), seja superior a 2,5. Neste sentido, é necessário haver uma forma de estimar o comportamento das bombas de calor para preparação de AQS. Nas bombas de calor aerotérmicas, o SPF é calculado a uma temperatura do ar fixa, igual a 7°C. Se a bomba de calor for assistida por energia solar térmica, deverá haver uma metodologia que calcule o SPF tendo em conta a variação do clima.

Tendo isto em conta, o presente trabalho tem como propósito o desenvolvimento de uma ferramenta de cálculo em Visual Basic, que simule anualmente o funcionamento de bombas de calor de expansão direta assistidas por energia solar, para a preparação de AQS para o clima português. O programa terá como base resultados obtidos experimentalmente no LNEG e simulações efetuadas em ambiente TRNSYS, e terá especial interesse para os fabricantes de bombas de calor, visto conseguir simular, num curto período de tempo, o consumo de eletricidade por parte das bombas de calor que comercializam, assim como a energia que é fornecida por estas. Deste modo, poderá ser avaliada a viabilidade das bombas de calor para a localidade e o tipo de consumo que o cliente desejar, de forma semelhante à realizada por programas de dimensionamento de sistemas solares térmico já existentes.

No capítulo 2 é apresentada uma revisão bibliográfica sobre energia solar, bombas de calor e métodos numéricos, sendo também brevemente descrito o Visual Basic, assim como a legislação relevante para o tema em análise. Os componentes e métodos usados no desenvolvimento da aplicação encontram-se descritos no capítulo 3, sendo que os seus resultados são apresentados no capítulo 4. Por fim, no capítulo 5 são discutidas as principais conclusões e o trabalho a desenvolver no futuro.

Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica

2.1. Energia Solar

O processo de fusão nuclear que ocorre no interior do Sol leva a que enormes quantidades de energia sejam irradiadas da superfície solar, a qual chega ao nosso planeta de forma mais ou menos constante, com uma potência de aproximadamente 1350 W/m^2 [13]. Contudo, a energia recebida num dado local varia a cada instante, sendo também diferente consoante a localização geográfica, a climatologia local e o ângulo de incidência. Para quantificar esta energia deve-se ter em conta a soma da radiação direta, da radiação difusa (radiação difundida pelas moléculas que compõem a atmosfera) e da radiação refletida por outras superfícies (solo, objetos, vegetação) [14].

O facto de a velocidade de rotação da Terra ser constante implicaria que, numa determinada localização, o Sol estivesse sempre na mesma direção, à mesma hora, em qualquer dia. No entanto, dada a excentricidade da órbita da Terra e de o seu eixo de rotação não ser perpendicular à órbita, essa posição varia ao longo do ano. Assim, para se poder conhecer a posição solar num ponto específico, é necessário saber o dia do ano, a latitude e a hora local (LT). Com estas três variáveis, e usando funções dependentes, obtém-se o ângulo incidente dos raios solares a qualquer instante.

A partir da LT é possível calcular a hora solar local (LST), com recurso a um fator de correção que tem em conta a variação da longitude dentro do mesmo fuso horário. Contudo, os dados utilizados para o desenvolvimento da aplicação já se encontram no formato LST, não sendo necessária qualquer correção.

O ângulo horário (HRA) converte a LST para graus, isto é, transforma as 24 horas do ciclo diário da LST em 360° (com valores compreendidos entre -180° e $+180^\circ$). Quando o valor do HRA é zero, o Sol encontra-se na sua posição de meio-dia, ao passo que entre a posição de meia-noite e a posição de meio-dia são considerados valores negativos. Durante o resto do dia, HRA apresenta valores positivos [15].

$$HRA = 15^\circ \times (LST - 12) \quad (1)$$

Ao ângulo formado entre a linha do equador e uma linha desenhada a partir da Terra até ao Sol dá-se o nome de declinação (δ). Este ângulo varia devido à translação da Terra em torno do Sol

e à inclinação do eixo de rotação da Terra. Como o eixo tem uma inclinação de $23,45^\circ$, δ varia anualmente entre $+23,45^\circ$ e $-23,45^\circ$, no solstício de verão e inverno, respetivamente. Nos equinócios de primavera e outono, a δ é nula [15].

$$\delta = \sin^{-1} \left(23,45^\circ \times \sin \left(\frac{360}{365} (d - 81) \right) \right) \quad (2)$$

O ângulo da altura solar (α) é, por definição, a altitude angular do Sol em relação ao horizonte, quantificando a posição do Sol no eixo vertical em graus. Assim, ao nascer-do-Sol e ao pôr-do-Sol, o α é 0° . O ângulo zenital (ζ) mede o ângulo entre o Sol e a normal ao plano, sendo complementar com α .

$$\alpha = \sin^{-1}(\sin(\delta) \times \sin(\varphi) + \cos(\delta) \times \cos(\varphi) \times \cos(HRA)) \quad (3)$$

$$\zeta = 90^\circ - \alpha \quad (4)$$

Relacionando os ângulos supra citados, é possível calcular o ângulo de incidência dos raios solares sobre uma superfície horizontal a qualquer hora do dia, pois sabendo-se as posições vertical e horizontal do Sol, sabe-se também a sua posição exata no céu. A determinação deste ângulo é essencial para calcular a quantidade de energia recebida por uma superfície. Tendo em conta uma superfície com ângulo de inclinação β e virada a sul, através da seguinte fórmula é possível relacionar a radiação direta incidente na superfície inclinada com a radiação direta incidente na superfície horizontal [16]:

$$I_{dir\beta} = I_{dir} \times (\sin(\alpha) \times \cos(\beta) + \cos(\alpha) \times \cos(A_z) \times \sin(\beta)) \quad (5)$$

Em que A_z representa o azimute solar, calculado pela seguinte equação [16]:

$$\sin(A_z) = \frac{\sin(HRA) \times \cos(\delta)}{\cos(\alpha)} \quad (6)$$

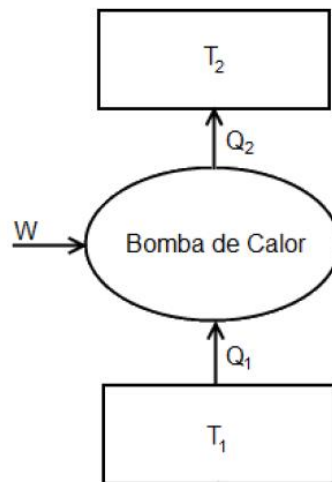
A irradiância global na superfície inclinada ($I_{g\beta}$) vem [16]:

$$I_{g\beta} = I_{dir\beta} + I_{dif} \times (1 + \cos \beta)/2 \quad (7)$$

2.2. Bombas de Calor

As bombas de água têm como função o transporte de água entre dois depósitos a diferentes altitudes. Embora a água flua naturalmente do depósito superior para o inferior, a bomba de água consegue fazer a água circular de uma posição inferior para uma posição superior gastando relativamente pouca energia. De forma análoga, as bombas de calor transferem calor de um meio a temperatura mais baixa para outro com temperatura mais alta, invertendo o fluxo natural de calor. Este processo é utilizado, por exemplo, no aquecimento de água a partir do ar exterior ou a partir de permutadores geotérmicos [17].

Para ocorrer transferência de calor de um nível mais baixo de temperatura para um nível mais alto, é necessário haver um fornecimento adicional de energia ao sistema, de forma a respeitar a segunda lei da termodinâmica. Através de um compressor, a bomba de calor fornece trabalho (W) (energia externa) a um fluido, permitindo retirar calor de um meio com uma temperatura mais baixa (T_1) e, assim, aquecer outro meio que se encontra a uma temperatura superior (T_2) [17].



Esquema 1 – Princípio de funcionamento de uma bomba de calor (adaptado [17]).
T – temperatura; Q – calor; W – trabalho

O coeficiente de desempenho de uma bomba de calor (COP) é um dos principais parâmetros necessários para a caracterização da mesma e é obtido relacionando o calor útil que a bomba de calor fornece, com o trabalho por ela requerido. Tendo em conta as variáveis do Esquema 1, no caso de a bomba de calor aquecer o espaço, o seu COP será dado pela expressão:

$$COP = \frac{Q_2}{W} \quad (8)$$

Por sua vez, caso o funcionamento da bomba de calor tenha como objetivo arrefecer o espaço, o COP é representado pela fórmula:

$$COP = \frac{Q_1}{W} \quad (9)$$

A energia extraída da fonte de calor não é tida em conta pois não é um gasto da bomba de calor, sendo de fonte renovável, quer provenha do ar, água ou solo [17]. Outro parâmetro que avalia o comportamento de uma bomba de calor é o SPF, o qual, segundo a norma EN 15316-4-2, é calculado através da seguinte equação:

$$SPF = \frac{Q_{ag,BC} + Q_{ar,BC}}{E_{ar,ag} + W_{aux} + W_{sby}} \quad (10)$$

Consistindo, portanto, no rácio entre a energia útil para AQS ($Q_{ag,BC}$), o aquecimento ou arrefecimento de espaço interior ($Q_{ar,BC}$), e a energia elétrica consumida pelo compressor ($E_{ar,ag}$), pelo sistema de apoio (W_{aux}) e em *standby* (W_{sby}) [18].

Para efetuar o transporte de energia entre as fontes quente e fria, e vice-versa, é necessário um fluido. Esse fluido recolhe e liberta calor (evaporando e condensando), através de variações de temperatura e pressão. Resumidamente, o ciclo da bomba de calor processa-se do seguinte modo: numa zona em que a pressão do fluido é baixa, este recebe calor e passa de estado líquido a gasoso, mantendo a sua temperatura relativamente constante. A seguir, no compressor, a pressão do fluido aumenta, provocando igualmente o seu aumento de temperatura. Depois, ao entrar no condensador, liberta calor para o espaço/água que se pretende aquecer, retornando ao estado líquido. O fluido é então arrefecido através de um processo de expansão isentálpica executado na válvula de expansão, que deixa o fluido pronto para regressar ao início do ciclo (**Figura 2**) [17].

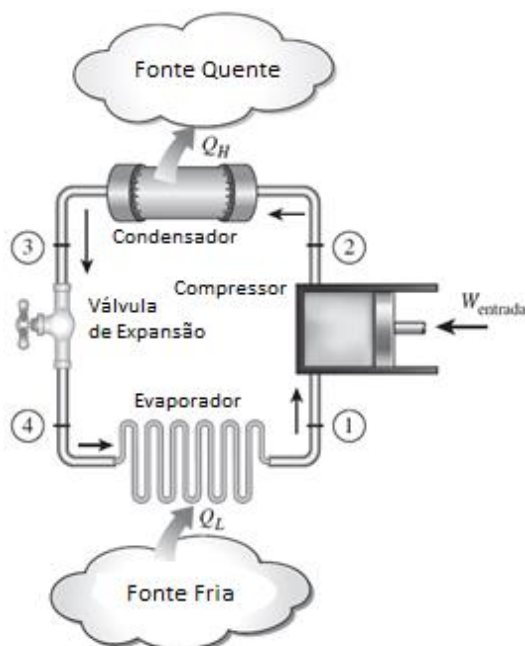


Figura 2 – Funcionamento de uma bomba de calor (adaptado [17])

A entalpia e a entropia são duas grandezas físicas muito comuns na caracterização dos processos de bombas de calor e outras máquinas térmicas. A energia em forma de calor passível de ser retirada de um sistema termodinâmico designa-se por entalpia (h) e é útil, particularmente, para analisar processos de geração de potência e de refrigeração. Pode ser calculada através da seguinte fórmula:

$$h = u + P \times v \quad (11)$$

Em que u representa a energia interna do sistema, P a pressão, e v o volume.

Segundo a segunda lei da termodinâmica, num sistema isolado, o trabalho pode ser completamente convertido em calor, ou seja, em energia térmica, mas a energia térmica não pode ser completamente convertida em trabalho. À energia térmica que não pode ser convertida em trabalho, dada a irreversibilidade do processo, dá-se o nome de entropia.

O **Gráfico 1** ilustra o funcionamento termodinâmico de uma bomba de calor, através dos gráficos temperatura-entropia (A) e pressão-entalpia (B). Observa-se que a compressão adiabática (1-2) provoca o aumento de temperatura, assim como um ligeiro aumento da entalpia do sistema. De seguida, este vapor é arrefecido até ficar saturado (2-3). Ao condensar (3-4), o fluido liberta calor num processo isotérmico, isto é, mantendo a mesma temperatura. Essa temperatura é posteriormente diminuída pela descompressão levada a cabo pela válvula de

expansão (4-5). No evaporador, o fluido retira energia do exterior do sistema num processo isobárico, passando ao estado gasoso e saturado do início do ciclo (5-1) [19].

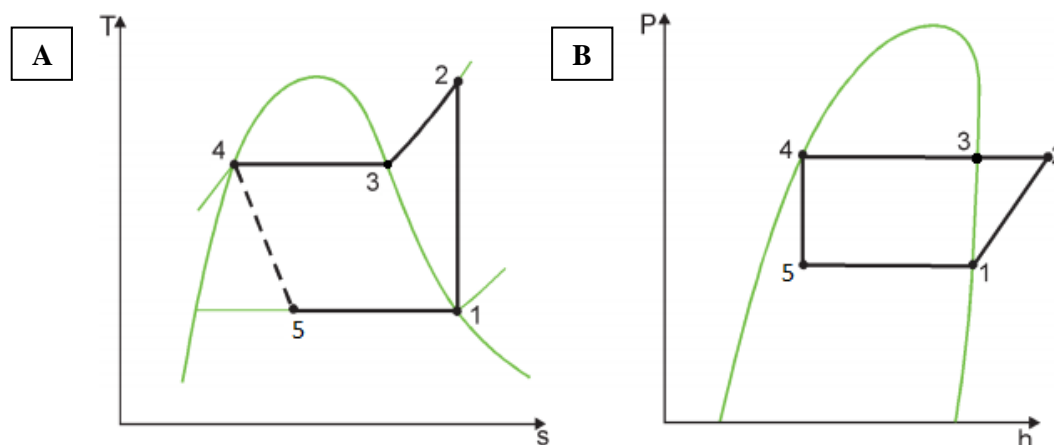
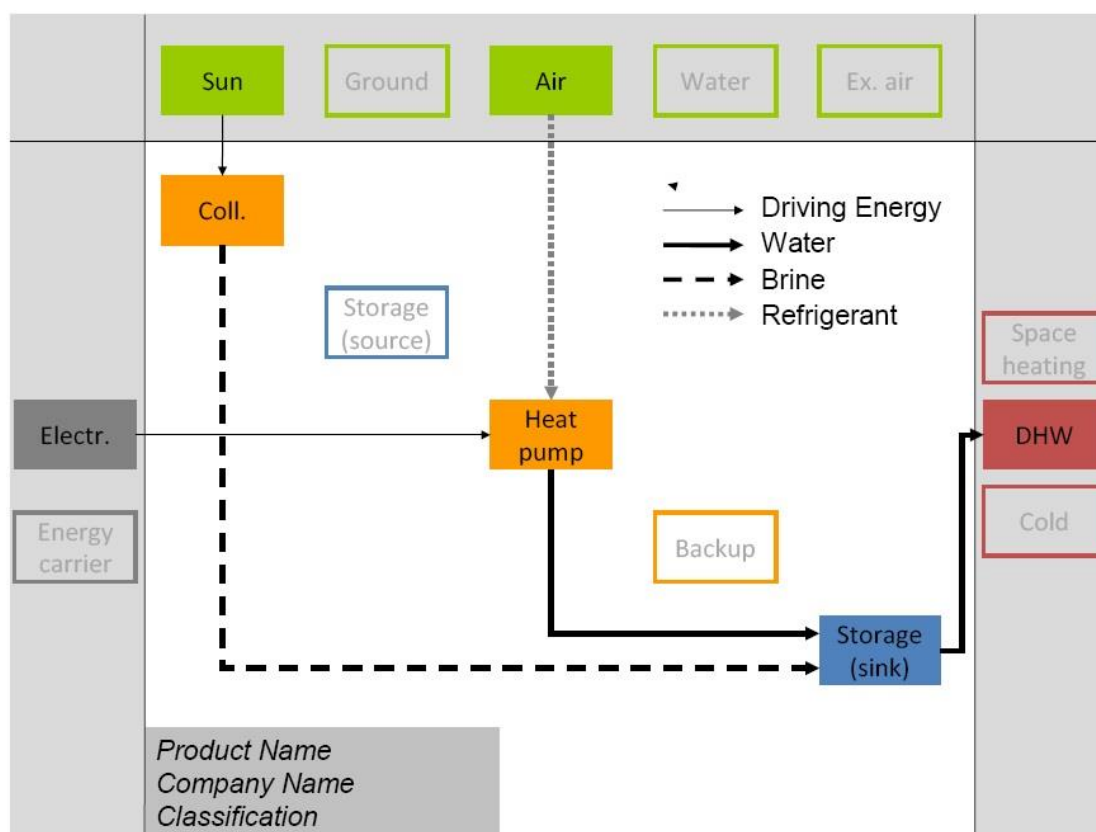


Gráfico 1 – Temperatura-Entropia (A) e Pressão-Entalpia (B) do ciclo termodinâmico da bomba de calor

De forma a uniformizar os sistemas combinados de energia solar térmica e bombas de calor, em 2010 foi proposto um sistema de classificação para bombas de calor, no âmbito da *Task 44* [20].

Os sistemas são descritos utilizando um esquema de fluxo de energia (Esquema 2), em que as fronteiras do sistema se encontram assinaladas com fundo cinzento e onde são representadas as fontes de energia e a finalidade da energia útil. As fontes de energia que necessitam de ser compradas situam-se no lado esquerdo do gráfico (retângulos a cinzento escuro) e as fontes de energia de origem ambiental ficam na parte superior (retângulos a verde). Em baixo, é possível encontrar o nome do fabricante e o tipo de sistema. Do lado direito estão representadas as finalidades da energia útil, como a preparação de AQS ou o aquecimento de espaços (retângulos vermelhos). Ao centro, em fundo branco, encontram-se os cinco componentes do sistema tidos como essenciais: coletor solar, bomba de calor e aquecedor auxiliar (retângulos a laranja), complementados por sistemas de armazenamento, um no lado da fonte fria e outro no lado da fonte quente da bomba de calor (retângulos a azul). O gráfico é completado por linhas de vários tipos que representam os fluxos de energia entre os vários elementos do sistema, e entre as fronteiras e o sistema, não sendo a grossura das linhas representativa da quantidade de energia transportada. Visto não serem necessárias para caracterizar o sistema, as perdas de energia não figuram na representação gráfica.



Esquema 2 – Funcionamento de uma bomba de calor assistida por energia solar [20]

Em alternativa, toda a informação apresentada no **Esquema 2** pode ser resumida num código de abreviaturas representado na **Figura 3**. Por convenção, as fontes de energia dos coletores (S) e das bombas de calor (HP) ficam sobrescritas – no caso de serem fontes frias – e subscritas – no caso de serem fontes quentes – em redor da abreviatura SHP (bomba de calor solar). Caso exista mais do que uma fonte de calor, as abreviaturas de cada uma ficam separadas por vírgulas.

$$\begin{matrix} \text{sources} & & \text{sources} \\ \text{sinks} & \text{SHP} & \text{sinks} \end{matrix}$$

Figura 3 – Nomenclatura representativa do funcionamento de uma bomba de calor [20]

As diferentes fontes de calor que podem caracterizar o sistema encontram-se descritas na **Tabela 1**, com as respetivas abreviaturas:

Tabela 1 – Abreviaturas utilizadas para transmitir informação do sistema através de um código de letras (adaptado [20])

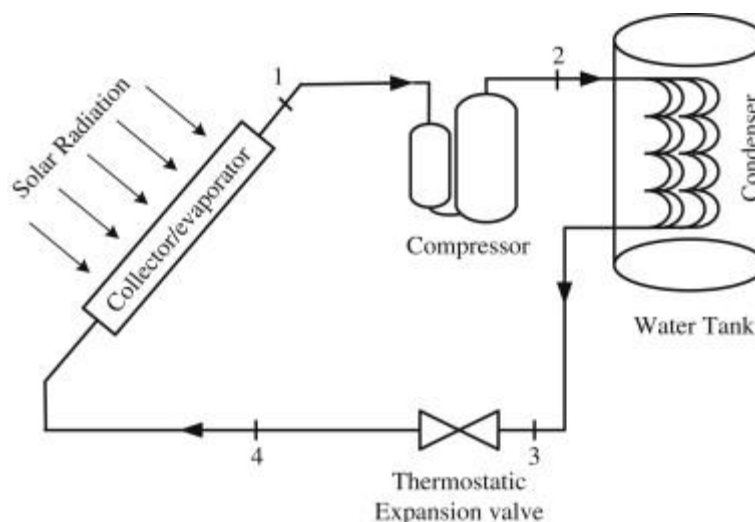
S: coletor solar	Air: ar	srS: armazenamento na fonte fria
HP: bomba de calor	G: solo	skS: armazenamento na fonte quente
Sol: irradiação solar	W: água subterrânea	SH: aquecimento de espaços

2.2.1. Bomba de Calor de Expansão Direta Assistida por Energia Solar

As bombas de calor com expansão direta assistidas a energia solar (DX-SAHP) começam a ser amplamente comercializadas para várias aplicações, incluindo preparação de AQS. Neste tipo de sistemas, o coletor solar funciona como o evaporador da bomba de calor, de forma a transferir a energia solar para o fluido frigorigéneo utilizado no sistema. É de referir que o uso de fluido frigorigéneo como fluido da bomba de calor e do coletor resulta num arrefecimento do coletor. Esta situação tem como vantagem o aumento do rendimento do coletor uma vez que este opera a uma temperatura inferior, levando ao aumento do coeficiente de desempenho da bomba de calor e à redução dos seus custos de operação, comparativamente com as bombas de calor assistidas por energia solar (SAHP) convencionais [21].

Uma DX-SAHP – como a utilizada neste trabalho – é composta por: um coletor solar sem cobertura, um depósito de AQS, um compressor elétrico, uma válvula de expansão termostática, um controlador e um sistema de apoio. O fluido de transferência de calor é o fluido frigorigéneo da bomba de calor.

A DX-SAHP funciona da seguinte forma: ao atingir o coletor solar, a radiação solar é absorvida, e aquece a superfície do coletor. Quando passa pelo coletor, o fluido de transferência de calor (que se encontrava no estado líquido) efetua trocas de calor com o coletor/evaporador, aquecendo e evaporando. De seguida, o compressor elétrico aplica trabalho sobre o fluido frigorigéneo evaporado, aumentando a sua pressão. Ao chegar ao condensador, o fluido frigorigéneo condensa e transfere o seu calor latente para o exterior do condensador, que se encontra a uma temperatura mais baixa. Dado que o condensador tem o permutador de calor na parte mais baixa do depósito de AQS, o calor é transferido para a água. Após abandonar o condensador, o fluido de transferência de calor passa por uma válvula de expansão termostática que baixa a sua pressão, regressando ao coletor. O sistema de apoio, que consiste numa resistência elétrica, situa-se a seguir ao depósito e é acionado quando a bomba de calor não consegue suprir as necessidades de consumo. O acionamento deste sistema encontra-se ainda dependente de um termostato colocado à saída do depósito ou a meio do mesmo (**Esquema 3**) [22] [23].



Esquema 3 – Componentes de uma bomba de calor assistida por energia solar [23]

Coletores

O coletor termodinâmico tem como função a conversão de radiação solar em calor, através de uma superfície que aquece ao absorver a radiação solar. Esta por sua vez, transmite calor por condução para o fluido que circula no coletor, que será utilizado para evaporar o fluido frigorigéneo. Contudo, no coletor efetuam-se também outro tipo de trocas que estão dependentes da relação entre a temperatura de orvalho e a temperatura do coletor, da relação entre a temperatura ambiente (T_{amb}) e a temperatura do coletor, e da velocidade do vento (u_{vento}), tendo como consequência a alteração do rendimento do coletor [23]. Um sistema DX-SAHP pode funcionar com diferente configuração, tipo e número de coletores solares, sendo que quanto maior for a área de coletores, maior deverá ser o COP. Em ambientes com elevada radiação solar e temperaturas altas, os sistemas com coletores sem cobertura permitem ao sistema atingir um COP mais elevado relativamente aos sistemas com coletores com cobertura [24]. Os últimos são também mais dispendiosos uma vez que o preço por m^2 é mais elevado [24].

Sistema de Armazenamento

A incapacidade de aquecer água instantaneamente em qualquer momento de necessidade de consumo torna inevitável a adição de um depósito de armazenamento, permitindo ao consumidor ter água quente à sua disposição num maior período de tempo, e não só quando existe radiação suficiente para aquecer a água à temperatura desejada [25]. Outra vantagem é a utilização de sistemas de baixa potência que vão armazenando calor no depósito ficando o calor disponível para satisfazer as necessidades de consumo futuras.

A configuração dos depósitos é bastante variável, no que diz respeito a ligações de entrada e de saída e a permutadores de calor. Os depósitos são tipicamente constituídos por aço inoxidável, aço esmaltado ou revestidos por plástico. No caso de aquecimento de água para habitações, a sua capacidade deverá ser de algumas centenas de litros [14].

O comportamento térmico dos depósitos de armazenamento depende essencialmente de duas características muito importantes: as perdas térmicas e a estratificação de temperaturas dentro do depósito. As perdas térmicas estão relacionadas com a condutividade térmica do depósito – U_{dep} – que representa a potência perdida (Q_{calor}) por unidade de área exterior do depósito (A_{dep}) e por unidade de diferença de temperatura (ΔT), entre o ambiente e a água no interior do depósito.

$$U_{dep} = \frac{Q_{calor}}{A_{dep} \times \Delta T} \quad (12)$$

A condutividade térmica varia em função das propriedades do material que constituem o depósito. A estratificação da temperatura dentro do depósito apresenta várias vantagens:

- permite uma maior eficiência das trocas de energia que ocorrem no permutador, levando a que a temperatura de entrada do fluido no coletor seja menor e, conseqüentemente, que o rendimento do coletor seja melhor;
- a temperatura da água de consumo será mais elevada do que temperatura média da água no depósito;
- não ocorrer mistura entre a água quente no depósito e a água da rede que é introduzida durante o consumo.

Para garantir uma boa eficácia do sistema de estratificação, o depósito deverá apresentar um posicionamento vertical, ainda que nem sempre seja a melhor opção arquitetónica. De forma a manter a estratificação, é ainda recomendável a colocação de defletores na entrada de água fria da rede, para evitar que ocorra mistura com a água quente do depósito [25].

Sistema de Apoio

O sistema de apoio partilha com o sistema de armazenamento a função de satisfazer as necessidades de consumo nos momentos em que existe um défice entre a energia que o consumidor solicita e a energia que a bomba de calor consegue fornecer. No entanto, é essencial que o sistema de apoio sirva apenas como complemento, de forma a diminuir os gastos com a energia convencional e a viabilizar ao máximo a utilização de energia de fonte renovável [25]. A resistência elétrica é o sistema de apoio utilizado para este tipo de configuração.

Compressor

Este componente do sistema é responsável pelo único consumo de energia elétrica da bomba de calor, necessário para fornecer trabalho ao fluido refrigerante, de forma a produzir uma compressão adiabática [17].

2.3. Visual Basic

O Visual Basic é uma linguagem de programação projetada para ser facilmente entendida pelo utilizador, assente num ambiente integrado de desenvolvimento, criado em 1991 pela Microsoft. O *software* foi desenvolvido com o intuito de ser de fácil utilização e tem como funcionalidades o desenvolvimento rápido de aplicações, o desenvolvimento de aplicações de interface gráfica do utilizador, o acesso a bases de dados de vários tipos de dados e a criação de controladores [26].

A programação em Visual Basic consiste numa combinação entre o arranjo gráfico de uma aplicação (organização de componentes ou controladores num formulário e especificação de atributos e ações para os componentes) e a escrita de linhas de código adicionais (necessárias para a interação de diferentes componentes e atributos). Para além destas facilidades, o Visual Basic permite também o desenvolvimento de tarefas comuns a outras linguagens de programação como, por exemplo, matemática avançada. Permite ainda a criação de ficheiros executáveis dos programas criados, os quais funcionam em qualquer sistema operativo com a plataforma .NET Framework [26].

2.4. Métodos Numéricos

Os métodos numéricos são conjuntos de processos usados com vista a obtenção de soluções numéricas em problemas onde não é possível, ou desejável, chegar a uma solução por métodos analíticos. Estes procedimentos permitem assim encontrar soluções aproximadas e válidas de um modelo ou sistema, e são utilizados em situações em que: os métodos analíticos não se aplicam ou envolvem uma injustificável quantidade de cálculos; os problemas são complexos e envolvem processos não lineares; os dados do problema são obtidos de forma prática, formando um conjunto de valores que necessitam de ser tratados (por diferenciação ou integração, por exemplo) [27].

2.4.1. Sistema de Equações Lineares

Um sistema de equações lineares consiste num conjunto finito de equações que partilham as mesmas incógnitas, sendo que o número de incógnitas não pode ser maior do que o número de equações lineares. Estes sistemas representam-se na forma:

$$Ax = b \quad (13)$$

Em que A representa a matriz dos coeficientes do sistema, x é a matriz-coluna das incógnitas e b é a matriz-coluna dos termos independentes. O número de colunas da matriz dos coeficientes consiste no número de incógnitas do sistema, enquanto o número de linhas é dado pelo número de equações.

O sistema diz-se possível e determinado, caso haja apenas uma solução, e diz-se possível e indeterminado, se existir mais do que uma solução. Se não existir solução o sistema diz-se impossível. Quanto ao método de resolução, estes sistemas podem ser classificados como métodos diretos (a solução exata é encontrada) ou métodos indiretos (funcionam por processo iterativo, aproximando-se da solução passo a passo).

Caso a dimensão do sistema seja grande, isto é, tenha muitas incógnitas (e consequentemente muitas equações) a resolução destes sistemas torna-se bastante complexa. Contudo, verificou-se um desenvolvimento tecnológico de tal ordem que foi possível criar computadores digitais capazes de resolver sistemas de equações de grande complexidade [27].

Eliminação de Gauss-Jordan

A eliminação de Gauss consiste num algoritmo de resolução de sistemas de equações lineares que tem como propósito a conversão da matriz aumentada (possui os coeficientes das incógnitas de um sistema, em conjunto com os termos independentes – $[A|b]$) em forma de escada.

$$\left[\begin{array}{ccc|c} 1 & 3 & 1 & 9 \\ 1 & 1 & -1 & 1 \\ 3 & 11 & 5 & 35 \end{array} \right] \rightarrow \left[\begin{array}{ccc|c} 1 & 3 & 1 & 9 \\ 0 & -2 & -2 & -8 \\ 0 & 2 & 2 & 8 \end{array} \right] \rightarrow \left[\begin{array}{ccc|c} 1 & 3 & 1 & 9 \\ 0 & -2 & -2 & -8 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{array} \right] \rightarrow \left[\begin{array}{ccc|c} 1 & 0 & -2 & -3 \\ 0 & 1 & 1 & 4 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{array} \right]$$

Figura 4 – Eliminação de Gauss-Jordan [28]

Esta forma é obtida através de uma sequência de operações entre as linhas da matriz, até que a parte inferior esquerda da matriz fique preenchida com zeros. Existem três tipos de operações

que permitem chegar a esta forma: trocas entre linhas, multiplicação de uma linha por um número diferente de zero, e adição de um múltiplo de uma linha a outra linha.

Se uma matriz está em forma de escada, a primeira entrada não nula de cada linha é designada de pivô. Se o pivô for 1 e for o único elemento não nulo da sua coluna, então a matriz diz-se em forma de escada reduzida. Nesta situação está-se perante a eliminação de Gauss-Jordan, uma variante do método de Gauss para a qual a matriz-coluna b representa uma solução do sistema [29].

2.4.2. Sistema de Equações Não-Lineares

Apesar de os métodos de resolução de sistemas de equações lineares serem muito úteis para caracterizar vários sistemas que se desejem estudar, nem sempre é possível traduzir os seus processos através de equações lineares do tipo $f(x) = a + bx$, tendo de se recorrer a equações não-lineares.

Resolver um sistema de equações não-lineares pode resultar na obtenção de uma, várias soluções, ou nenhuma solução. Se houver soluções é necessário interpretá-las, fazendo uso de critérios físicos e técnicos envolvidos no problema, visto que, por exemplo, uma temperatura expressa em Kelvin (K) nunca poderá ter um valor negativo. Outra particularidade dos sistemas de equações não-lineares é o facto de a solução poder não ser encontrada usando um número finito de operações. Posto isto, os métodos de resolução para este tipo de sistemas são do tipo iterativo, mediante os quais se constrói um vetor com a solução para cada passo da iteração, o qual será próximo do vetor com a solução do sistema de equações não-lineares, caso o método seja eficaz. O processo cessará quando o erro da solução (ou das equações) for inferior ao erro máximo definido. Não existe um método universal para resolver sistemas de equações não-lineares, sendo que métodos diferentes utilizados no mesmo sistema podem resultar em soluções bastante distintas [30].

Método de Newton-Raphson

O método de Newton-Raphson é uma ferramenta poderosa para resolver equações através do uso de aproximações lineares.

Seja $f(x)$ uma função e r uma raiz da equação $f(x) = 0$. No início do processo iterativo define-se x_0 como uma estimativa de r . Sendo $r = x_0 + h$, a diferença entre a raiz e a sua estimativa é h .

Admitindo h como “pequeno”, pode usar-se uma aproximação linear para concluir que:

$$0 = f(r) = f(x_0 + h) \approx f(x_0) + h \cdot f'(x_0) \quad (14)$$

No caso de $f'(x_0)$ não ser próximo de 0,

$$h \approx -\frac{f(x_0)}{f'(x_0)} \quad (15)$$

Logo,

$$r = x_0 + h \approx x_0 - \frac{f(x_0)}{f'(x_0)} \quad (16)$$

Chegando-se assim a uma nova estimativa de $r - x_1$ – dada por:

$$x_1 = x_0 - \frac{f(x_0)}{f'(x_0)} \quad (17)$$

Da mesma forma que se obteve x_1 , é possível calcular a próxima estimativa para r , x_2 . Ou seja, através da raiz estimada anteriormente – x_n – é possível definir x_{n+1} :

$$x_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)}. \quad (18)$$

Se se tratar de um sistema de equações não-lineares, é utilizado o método de Newton-Raphson juntamente com a eliminação de Gauss-Jordan.

Considerando um sistema de n equações não lineares com n incógnitas representado por:

$$f(x) = 0 \Leftrightarrow \begin{cases} f_1(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0 \\ f_2(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0 \\ \dots \\ f_n(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0 \end{cases} \quad (19)$$

e, de forma análoga à utilizada para chegar a (14), obtém-se:

$$0 = f(x) + [J_f(x)] \cdot \Delta x \quad (20)$$

Daqui resulta a fórmula para o cálculo das iterações que se aproxima da solução

$$x_{n+1} = x_n - [J_f(x_n)]^{-1} \cdot f(x_n) \quad (21)$$

Sendo $j = \{0, \dots, n\}$ e $i = \{0, \dots, n\}$, a matriz Jacobiana (J) de f é:

$$\{J(x)\}_{ij} = \frac{\partial f_i(x)}{\partial x_j} \quad (22)$$

Na prática, não se inverte explicitamente a matriz $J(x_n)$. Em vez disso, resolve-se o sistema linear:

$$J(x_n)\delta_n = -f(x_n) \quad (23)$$

em ordem ao passo δ_n e define-se a nova iteração como:

$$x_{n+1} = x_n + \delta_n \quad (24)$$

voltando o processo à equação (21), com um novo valor de x_n [31].

O processo iterativo chegará ao fim quando os critérios de paragem forem cumpridos [30], sendo usual impor-se que uma certa aproximação do erro relativo seja inferior a um valor tolerado:

$$\frac{\|x_{n+1} - x_n\|}{\|x_{n+1}\|} = \frac{\|\delta_n\|}{\|x_{n+1}\|} < tol \quad (25)$$

Ou impor-se que a proximidade de zero da norma da função seja inferior a um valor tolerado:

$$\|f(x_{n+1})\| < tol \quad (26)$$

2.5. Regulamentação e Legislação

A eficiência energética tem um papel fundamental para manter o equilíbrio entre o desenvolvimento tecnológico e a competitividade económica, contribuindo de forma bastante importante para um desenvolvimento sustentável e a consciencialização ambiental. Tais assuntos também fazem parte das prioridades da Europa, que graças a alterações regulamentares e legisladoras, procura o caminho certo na ótica da sustentabilidade.

A legislação que se segue rege o setor onde se insere o sistema estudado neste trabalho.

2.5.1. Regulamento (UE) N.º 814/2013

O regulamento (UE) N.º812/2013 foi aprovado a 2 de agosto de 2013 e dá execução à Diretiva 2009/125/CE do Parlamento Europeu e do Conselho aplicável a aquecedores de água e reservatórios de água quente [32]. Tem como objetivo a definição de requisitos de conceção ecológica para a colocação no mercado e/ou a entrada em serviço de aquecedores de água com uma produção térmica nominal igual ou inferior a 400kW, 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 (UE) N.º812/2013. Esta diretiva não é aplicável a aquecedores de água concebidos para utilizar predominantemente combustíveis gasosos ou líquidos produzidos a partir de biomassa, ou que utilizem combustíveis sólidos, entre outros. É também importante referir alguns conceitos definidos por este regulamento que são relevantes para o trabalho:

Aquecedor de água

É um dispositivo ligado a uma fonte de alimentação externa de água potável ou para uso sanitário equipado com um ou mais geradores. Tem como finalidade gerar e transferir calor para produzir água quente potável ou para uso sanitário, a diferentes níveis de temperatura, quantidades e caudais durante diferentes intervalos de tempo.

Potência calorífica nominal

É a potência calorífica declarada à saída do aquecedor de água quando aquece a água em condições nominais normais, expressa em quilowatt (kW).

Volume útil de armazenamento

É o volume nominal de um reservatório de água quente ou de um termoacumulador, expresso em litros (L).

Aquecedor de água com bomba de calor

Por definição é um aquecedor de água que utiliza calor ambiente a partir de uma fonte atmosférica, aquática ou geotérmica e/ou calor residual para a geração de calor.

Reservatório de água quente

É um recipiente destinado a armazenar água quente para fornecimento de água quente e/ou de aquecimento ambiente, incluindo eventuais aditivos. Não está equipado com um gerador de calor, podendo no entanto ter um ou mais aquecedores de imersão auxiliares.

Aquecedor de imersão auxiliar

Designa um aquecedor que utiliza o efeito de Joule em resistências elétricas. Está integrado num reservatório de água quente e só gera calor quando a fonte externa de calor é interrompida (por exemplo, durante os períodos de manutenção) ou avaria. Outra possibilidade é fazer parte de um reservatório de água quente solar, fornecendo calor quando a fonte de calor solar não é suficiente para proporcionar os níveis de conforto necessários.

A partir de 26 de setembro de 2015, a eficiência dos aquecedores de água não deve ser inferior aos valores da **Tabela 2**:

Tabela 2 – Eficiência energética para os diferentes perfis de carga [32]

Perfil de carga	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%

A quantidade de água misturada a 40°C não deverá ser inferior aos seguintes valores da **Tabela 3**:

Tabela 3 – Requisitos de água misturada a 40°C [32]

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

A 26 de setembro de 2017 os valores de eficiência energética serão alterados para os referidos na **Tabela 4**:

Tabela 4 – Eficiência energética dos aquecedores de água em 2017 [32]

Perfil de carga	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 26 de setembro de 2018, a eficiência energética dos aquecedores de água não deve ser inferior aos seguintes valores:

Tabela 5 – Eficiência energética do aquecimento de água em 2018 [32]

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

A eficiência energética do aquecimento de água por parte dos aquecedores de água tradicionais e aquecedores de água com bomba de calor (η_{wh}) é calculada da seguinte forma:

$$\eta_{wh} = \frac{Q_{ref}}{(Q_{fuel} + CC \times Q_{elec})(1 - SCF \times smart) + Q_{cor}} \quad (27)$$

Sendo que Q_{ref} é a energia de referência, Q_{fuel} é o consumo diário de combustível, Q_{elec} é o consumo diário de eletricidade, CC representa o coeficiente de conversão, SCF significa fator de controlo inteligente e $smart$ é o controlo inteligente. O fator de correção ambiente (Q_{cor}) é calculado, para bombas de calor, através da seguinte equação:

$$Q_{cor} = -k \times 24h \times P_{stdy} \quad (28)$$

Em que P_{stdy} representa a potência da bomba de calor em *standby*, e os valores de k estão indicados na **Tabela 6**:

Tabela 6 – Valores de k [32]

	3XS	XXS	XS	S	M	L	XL	XXL	3XL	4XL
k	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0	0	0

De forma a ser garantida a conformidade, os cálculos e as medições devem ser efetuados utilizando normas harmonizadas que tenham sido publicadas no Jornal Oficial da União Europeia ou utilizando outros métodos de cálculo e de medições que tomem em consideração os métodos geralmente reconhecidos como sendo os mais avançados.

Estas regulamentações são transpostas a nível nacional pelo Decreto-Lei N.º. 12/2011, de 24 de janeiro.

2.5.2. EN 16147:2011

A norma europeia EN 16147:2011 especifica métodos de ensaio de bombas de calor para preparação exclusiva de AQS, com compressor acionado eletricamente, e os respetivos relatórios de classificação [33].

Durante o ensaio devem ser mantidas as seguintes condições (**Tabela 7**):

Tabela 7 – Condições de teste para todos os sistemas [33]

Variável medida	Valor definido
Voltagem fornecida	Tensão nominal
Frequência fornecida	Frequência nominal
Fluxo de ar na fonte quente	Nominal, indicado pelo fornecedor. Quando é dado apenas um intervalo de valores, deve ser usado o valor máximo.
Temperatura da água na entrada (°C)	10
Fluxo da água quente (l/min)	4/10

Os testes avaliam vários parâmetros do sistema, estando divididos em seis etapas principais:

- A – Período de aquecimento;
- B – Determinação da energia de entrada;
- C – Determinação do consumo de energia e do COP para AQS utilizando perfis de extração. (várias extrações num ciclo de extrações);
- D – Determinação da temperatura de referência da água quente e a quantidade máxima de água quente utilizável numa única extração;

E – Determinação do intervalo de temperaturas em que se irá operar;

F – Testes de segurança.

Para a determinação do consumo de energia e do COP para AQS é definido um período de medições de 24h com consumos definidos a tempos exatos e energia extraída determinada (**Tabela 8**):

Tabela 8 – Fluxos dos tipos de extração [33]

Tipo de extração	Energia (kWh)	Caudal a ser mantido durante a extração (l/min)
Limpeza doméstica	0,105	4 ± 0,5
Pequena extração	0,105	4 ± 0,5
Limpeza do chão	0,105	4 ± 0,5
Lavagem de louça	0,315	4 ± 0,5
Lavagem de louça	0,420	4 ± 0,5
Lavagem de louça	0,735	4 ± 0,5
Grande extração	0,525	4 ± 0,5
Duche	1,400	4 ± 0,5
Duche (ciclo XL e XXL)	1,820	10 ± 0,5
Banho	3,605	10 ± 0,5
Banho (ciclo XL)	4,420	10 ± 0,5
Duche + Banho (ciclo XXL)	6,240	10 ± 0,5

No entanto, alguns destes consumos têm de respeitar outras exigências. Relativamente aos consumos “Banho” e “Limpeza do chão” é necessário manter uma diferença de pelo menos 30°C entre a temperatura da água de consumo e a temperatura da água de entrada. No caso do consumo “Lavagem de louça”, essa diferença deve ser igual ou superior a 45°C. Para os restantes consumos, é exigido que durante a extração a diferença média entre a água de consumo e a água de entrada seja de 15°C nalguns casos e 30°C noutros.

Diferentes arranjos destes consumos formam cinco ciclos de consumo distintos (S, M, L, XL, XXL) que são usados nos ensaios dos equipamentos.

2.5.3. Decisão da CE: 2013/114/EU

A 1 de março de 2013 foi publicada no Jornal Oficial da União Europeia a Decisão da CE: 2013/114/EU que estabelece as orientações para os Estados-Membros relativamente ao cálculo

da energia renovável que é 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 método de base para o cálculo desta energia encontra-se no Anexo VII da Diretiva 2009/28/CE onde estão definidos os três parâmetros a ter em conta para efeitos de metas respeitantes às energias renováveis [34]. São eles: a eficiência do sistema de energia (η ou η_a); a quantidade estimada de energia útil fornecida pelas bombas de calor (Q_{usable}); o SPF.

Em conformidade com o Anexo VII da Diretiva, a quantidade de energia renovável fornecida pelas tecnologias das bombas de calor (E_{RES}) deve ser calculada através da seguinte fórmula:

$$E_{RES} = Q_{usable} \times \left(1 - \frac{1}{SPF}\right) \quad (29)$$

Em que Q_{usable} é o calor total útil fornecido pelas bombas de calor, calculado como o produto da capacidade nominal de aquecimento (P_{rated}) e as horas equivalentes anuais de bomba de calor (H_{HP}), expresso em GWh.

$$Q_{usable} = H_{HP} \times P_{rated} \quad (30)$$

H_{HP} consiste no número anual presumido de horas durante as quais uma bomba de calor tem de fornecer calor à capacidade nominal para fornecer o calor total utilizável fornecido pelas bombas de calor, expressas em horas. Já (P_{rated}) consiste na capacidade de arrefecimento ou de aquecimento do ciclo de compressão do vapor, expresso em GW. Por último, SPF define-se como 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 ao rácio de energia primária sazonal líquida em modo ativo ($SPER_{net}$) para as bombas de calor térmicas. A equação (29) é aplicada para bombas de calor para aquecimento ambiente. No caso das bombas de calor para preparação de AQS, Q_{usable} é a energia anual extraída do depósito de acordo com os perfis de extração.

A Diretiva define ainda critérios de desempenho mínimo das bombas de calor para efeitos de energia renovável. Segundo o Anexo VII, os Estados-membros devem assegurar que são tomadas em consideração unicamente as bombas de calor com um SPF superior a $1,15 \times 1/\eta$. Para que a energia seja considerada renovável, o SPF mínimo das bombas de calor elétricas deve ser 2,5, dado que a eficiência dos sistemas de energia (η) encontra-se fixada em 45,5%.

Capítulo 3 – Modelação do Sistema

O desenvolvimento de uma ferramenta intuitiva para o utilizador implica a simulação do comportamento dos elementos do sistema, tendo em conta as suas condições de funcionamento e as necessidades de consumo do utilizador. Para tal é imperativo o estudo do equipamento a simular, de forma a obter uma caracterização mais detalhada sobre os seus componentes e respetivo funcionamento. A investigação que deu origem ao trabalho “*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 [23], do Laboratório de Energia Solar (LES) do LNEG, permitiu obter informação detalhada sobre o funcionamento da bomba de calor e do depósito de 250 litros. Contudo, uma vez que para diferentes volumes do depósito alguns parâmetros são alterados, foram fundamentais os resultados de ensaios realizados posteriormente pela mesma equipa no LNEG para outras configurações do mesmo tipo de sistema, permitindo a caracterização para os restantes volumes.

3.1. Componentes da Bomba de Calor

A bomba de calor utilizada é do tipo DX-SAHP, sendo constituída por um depósito de armazenamento com compressor incorporado e um coletor solar termodinâmico que funciona como evaporador da bomba de calor.

Evaporador/Coletor Solar

O painel solar termodinâmico (**Figura 5**) é leve e não apresenta cobertura. Devido às características do fluido e do próprio painel, não são esperados problemas quer de aquecimento, quer de congelamento, e o fabricante estima uma vida útil de 25 anos.

Tabela 9 – Características do painel solar termodinâmico

Comprimento	2000 mm
Altura	800 mm
Espessura	20 mm
Peso	8 kg
Intervalo de inclinação	10° a 85°



Figura 5 – Painel solar termodinâmico

Depósito de Armazenamento

Os depósitos de armazenamento são cilindros verticais em inox/esmalte, com 58cm de diâmetro e diferentes alturas, que resultam em diferentes volumes, como indica a **Tabela 10**:

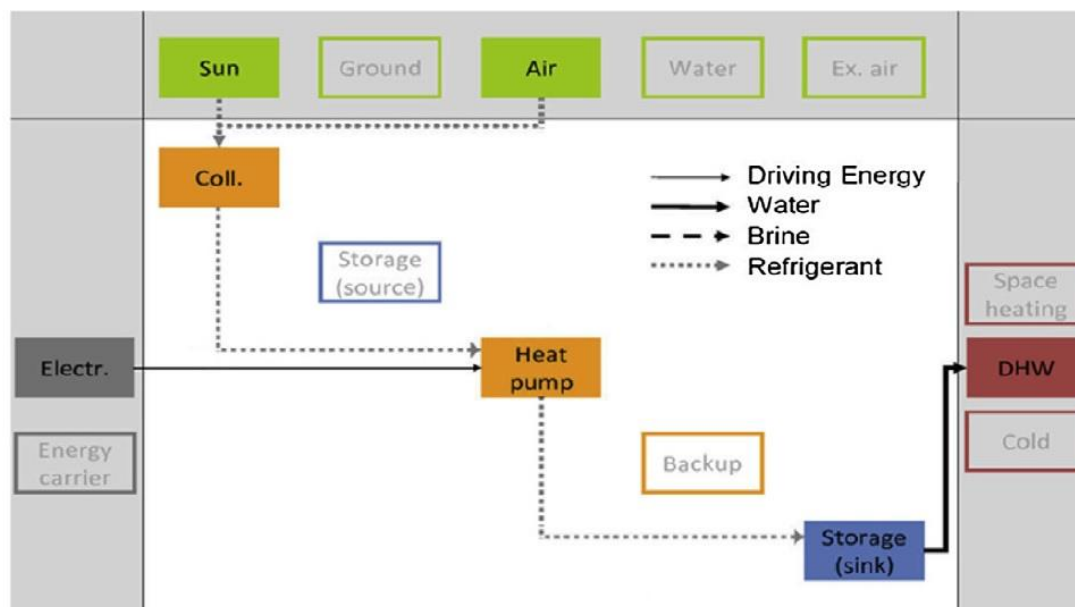
Tabela 10 – Características dos depósitos de armazenamento

	Sistema 200L	Sistema 250L	Sistema 300L
Volume (l)	200	250	300
Altura (m)	1,3	1,5	1,7
Diâmetro (m)	0,58	0,58	0,58
Altura da resistência (m)	0,13	0,06	0,17
Altura do controlador (m)	0,61	0,72	0,80
Potência da resistência (W)	1500	1500	1500
Peso (kg)	73	83	95

Compressor

O fluido utilizado é o R134a, que permite – devido às suas propriedades termodinâmicas e à válvula de expansão da bomba de calor – assegurar o funcionamento do sistema mesmo no dia mais frio do ano, pois não são registadas temperaturas tão baixas como esta em nenhuma zona de Portugal. Este componente, de potência nominal de 550W, entra em funcionamento sempre que a temperatura da sonda que se encontra no depósito for inferior à temperatura de *set-point* definida.

O fluxo de energia da bomba de calor em estudo encontra-se no **Esquema 4**, de forma semelhante ao **Esquema 2**.



Esquema 4 – Representação do funcionamento da DX-SAHP usada [23]

Os retângulos com fundo preenchido representam os componentes do sistema e as energias envolvidas. É possível observar que o coletor capta energia das fontes ambientais Sol e ar exterior (retângulos a verde), que são utilizadas pela bomba de calor juntamente com eletricidade (retângulo a cinzento escuro). O fluido da bomba de calor, ao permutar energia com o depósito (retângulo azul), aquece a água armazenada, fornecendo AQS (retângulos a vermelho).

O sistema pode também ser representado de uma forma mais resumida pela abreviatura da **Figura 6:**

Sol, Air^S
HP SHP
skS

Figura 6 – Nomenclatura representativa do funcionamento da DX-SAHP usada [23]

3.2. Clima e Localidades

A utilização de bases de dados é uma necessidade indispensável para um *software* de simulação como o desenvolvido neste trabalho. De forma a combinar a funcionalidade do programa com a localização para a qual o utilizador pretende a aplicação do sistema da bomba de calor, foram usados dados climáticos de cada município, bem como a sua latitude. Estes dados referem-se a informação horária de T_{amb} (°C), u_{vento} (m/s), humidade relativa (HR) (%), radiação global

horizontal (I_g) (Wh/m^2) e radiação difusa horizontal (I_{dif}) (Wh/m^2) durante um ano, sendo disponibilizados pelo LNEG através do *software* Climas-SCE. Foi utilizada a versão 1.0.5, de 11 de Fevereiro de 2014 [35].

Estes dados requerem tratamento, pois são horários e por vezes o programa funciona com intervalos de tempo de cem segundos. Assim torna-se necessário definir os valores entre horas, tendo tal sido realizado com recurso ao método de interpolação linear, para os valores de T_{amb} , u_{vento} , I_g , I_{dif} e HR . A seguir encontra-se um exemplo geral para a T_{amb} :

$$T_{amb}^i = T_{amb}^t + \frac{j}{hora} (T_{amb}^{t+1} - T_{amb}^t) \quad (31)$$

Em que os valores de índice t pertencem ao vetor importado do ficheiro Excel, com 8760 elementos (número de horas do ano); os valores de índice i pertencem ao novo vetor criado com 200385 elementos (intervalos de uma hora entre as 22:00 e as 7:00 e de cem segundos das 7:00 até às 22:00 para um ano); e a constante $hora$ representa a divisão do intervalo de tempo do novo vetor pelo intervalo de tempo do vetor importado do ficheiro Excel. O índice j é incrementado até ser igual a $hora$. Nesse momento, o índice t aumenta uma unidade e o valor de j volta a 0. Para os restantes parâmetros (u_{vento} , I_g , I_{dif} e HR) procede-se da mesma forma. A irradiância direta incidente no plano horizontal (I_{dir}), é calculada pela diferença entre I_g e I_{dif} no plano horizontal. Utilizando as equações (5) e (7) define-se $I_{dir\beta}$ e $I_{g\beta}$.

A 14 de abril de 2008 entrou em vigor o Decreto-Lei N.º 68/2008 (posteriormente alterado pelo Decreto-Lei N.º 85/2009, de 3 de Abril e pela Lei N.º 21/2010 de 23 de Agosto) que divide o território português em aglomerados de municípios tendo por base a Nomenclatura das Unidades de Território Estatísticas (NUTS). Embora na aplicação se encontrem disponíveis para simulação todos os municípios do país, a análise dos resultados foi feita apenas para uma localidade por cada zona da NUTS III, as mesmas que foram tidas em conta nos ensaios experimentais do LNEG e na **Tabela 11**:

Tabela 11 – NUTS III e localidades escolhidas

NUTS III	Localidade escolhida	Latitude [°]
Minho-Lima	Viana do Castelo	41,9
Alto Trás-os-Montes	Bragança	41,6
Cávado	Braga	41,6
Ave	Guimarães	41,5
Grande Porto	Porto	41,3
Tâmega	Amarante	41,2
Douro	Vila Real	41,1
Entre Douro e Vouga	Santa Maria da Feira	40,9
Baixo Vouga	Aveiro	40,6
Dão-Lafões	Viseu	40,7
Serra da Estrela	Seia	40,5
Beira Interior Norte	Guarda	40,6
Baixo Mondego	Coimbra	40,3
Pinhal Interior Norte	Oliveira do Hospital	40,1
Cova da Beira	Covilhã	40,2
Pinhal Interior Sul	Sertã	39,8
Beira Interior Sul	Castelo Branco	39,9
Pinhal Litoral	Leiria	39,8
Médio Tejo	Tomar	39,6
Oeste	Torres Vedras	39,3
Lezíria do Tejo	Santarém	39,1
Alto Alentejo	Portalegre	39,1
Grande Lisboa	Lisboa	38,9
Península de Setúbal	Setúbal	38,6
Alentejo Central	Évora	38,6
Alentejo Litoral	Grândola	38
Baixo Alentejo	Beja	37,9
Algarve	Faro	37,3
Região Autónoma dos Açores	Ponta Delgada	37,8
Região Autónoma da Madeira	Funchal	32,7

3.3. Caracterização de Consumos

Para cada uma das localidades foram simulados os três sistemas de bombas de calor (200L, 250L, e 300L), sendo que para o sistema de 200L de armazenamento foi estudado um ciclo de

consumo do tipo L da norma EN 16147:2011 e para os sistemas de 250L e 300L foi usado um ciclo do tipo XL da mesma norma (**Anexo I**). Para todos os casos foram calculados o SPF e o E_{ren} anual e mensal, a partir dos valores do consumo do compressor e da energia utilizada para consumo. Para o tratamento dos dados e análise comparativa foi utilizado o *software* Microsoft Excel.

3.4. Modelo do Depósito

Para a realização deste trabalho foi necessário caracterizar um depósito de energia térmica de um único fluido, sujeito a trocas de calor. No modelo é tida em conta uma carga que retira fluido do topo do depósito (onde a temperatura deverá ser mais alta), e introduz a mesma quantidade mássica de água no fundo do depósito. Esta carga representa os consumos de energia dos ciclos de consumo incorporados na aplicação. Ao depósito está também associada uma resistência elétrica que deverá ser acionada quando a T_{amb} atinja -5°C . Esta resistência encontra-se em diferentes cotas nos diferentes depósitos das bombas de calor projetadas (**Tabela 10**). Quanto à permuta de calor entre o fluido da bomba de calor e o fluido do depósito, esta é feita pelo condensador da bomba de calor.

Casos de Estudo

De forma a chegar ao modelo final utilizado no programa foram estudados outros modelos computacionais de simulação de depósitos de energia:

O modelo desenvolvido por Duffie & Beckman [36] reduz a complexidade real das equações de energia do depósito formando um modelo simples e prático. Pressupõe trocas de energia pelas paredes do depósito e a estratificação da temperatura do fluido contido. Ghaddar & Al-Marafie [37] publicaram um método ainda mais simples que o anterior, de forma a ser resolvido analiticamente. Contudo este modelo apresenta uma grande incompatibilidade pelo facto de admitir que o depósito é isolado de forma perfeita e não tem perdas de calor convectivo com o ambiente. Este pressuposto permite simplificar bastante o modelo matemático usado e facilitar a sua computação, mas torna-o incompatível com depósitos reais.

Kuhn, VanFuchs & Zob [38] desenvolveram um modelo em que cada entrada de volume de água não realiza misturas com o resto dos nós do depósito, criando camadas com diferentes volumes. Este modelo é ideal para modelos em que o volume do depósito se renova em intervalos de tempo algo curtos e, portanto, não se adequa ao modelo que se pretende desenvolver, devido à estagnação noturna.

Insatisfeito com o modelo incluído no *software* TRNSYS na altura, B. Newton [39] desenvolveu um modelo alternativo e muito detalhado, específico para depósitos de água de sistemas com coletores solares, dando especial atenção às fontes de aquecimento no depósito e às consequentes alterações criadas no fluxo da água armazenada.

Existem outros modelos que, apesar de satisfazerem grande parte dos critérios que permitem descrever os depósitos das bombas de calor caracterizados no programa, são desenvolvidos para depósitos onde o volume de fluido é variável, tornando os modelos incompatíveis com os sistemas em análise.

O modelo desenvolvido neste trabalho tem por base o modelo criado por Duffie & Beckman [37], mas tem em conta o contributo de B. Newton [40] para o aquecimento das várias camadas estratificadas acima da cota do permutador de calor.

Metodologia

Analisando os modelos de armazenamento de energia existentes e não tendo em conta os que usam soluções salinas, verifica-se que o método de diferenças finitas é utilizado na maioria dos casos, dos quais fazem parte o método explícito e o método implícito. Usando o método explícito, a temperatura num determinado nó no momento $t+1$ é influenciada pela temperatura desse nó e dos nós adjacentes no momento t . Estas equações são, normalmente, mais simples de resolver, mas necessitam de satisfazer critérios de estabilidade. Estes critérios existem de forma a limitar o erro, definindo um limite máximo para o intervalo de tempo do algoritmo, o que pode levar a que o programa demore demasiado tempo a simular o período pretendido. Usando o método implícito, a temperatura de um nó no instante $t+1$ depende da temperatura desse nó no instante t e da temperatura dos nós adjacentes no instante $t+1$. O esforço realizado computacionalmente para resolver o sistema de equações é bastante maior do que no caso do método explícito mas, uma vez que não é necessário respeitar critérios de estabilidade, o algoritmo pode utilizar intervalos de tempos maiores e, consequentemente, menos iterações. Apesar de no método implícito não haver limite máximo para o intervalo de tempo, deve ter-se atenção a este fator pois pode tornar o sistema menos fiável.

Tendo em conta que o modelo do depósito é simulado para um ano inteiro, o intervalo de tempo a ser utilizado não deve ser demasiado curto, de forma a não obrigar o programa a fazer um número exagerado de iterações e, consequentemente, demorar demasiado tempo. Por essa razão foi escolhido o método implícito.

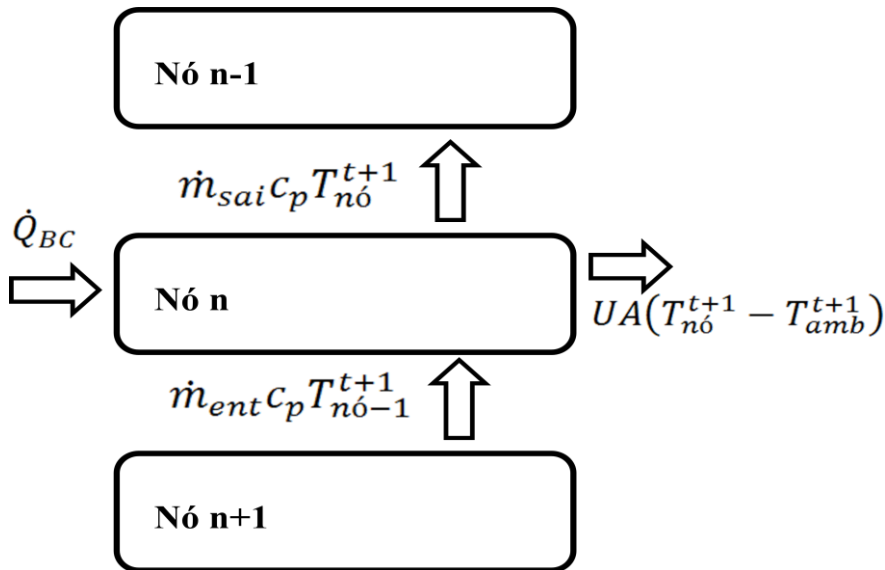
Sistema de Equações

A equação do balanço de energia no depósito representa a variação de energia no depósito (∂E) num determinado período de tempo (∂t), e é obtida calculando a diferença entre o somatório do fluxo de energia que entra no sistema (\dot{E}_{in}) e o somatório do fluxo de energia que sai do sistema (\dot{E}_{out}).

$$\frac{\partial E}{\partial t} = \sum \dot{E}_{in} - \sum \dot{E}_{out} \quad (32)$$

Esta equação é igualmente representativa do balanço de energia em cada nó do depósito.

Como ganhos energéticos são contabilizados as entradas de fluido no depósito, a energia transferida pela bomba de calor e a energia transferida pela resistência auxiliar. Por sua vez, as perdas energéticas contabilizam as trocas de energia com o ar interior e a saída de fluido do depósito. Como a temperatura de entrada do fluido definida é menor do que a temperatura do ar interior definida, podem ocorrer, esporadicamente ganhos de energia nos nós inferiores (em vez de perdas) nas trocas pela parede do depósito. (**Esquema 5**).



Esquema 5 – Trocas de energia entre camadas do depósito

A equação geral do balanço de energia num nó é:

$$\begin{aligned} \frac{m_{nó} c_p \partial T_{nó}}{\partial t} = & \dot{m}_{ent} c_p T_{ent} - \dot{m}_{sai} c_p T_{sai} - UA(T_{nó} - T_{amb}) + \dot{Q}_{BC} + \dot{Q}_{aux} \\ & + f_i^e \dot{m}_{ent} c_p T_{ag} - f_i^s \dot{m}_{sai} c_p T_{nó} \end{aligned} \quad (33)$$

Em que $m_{nó}$ é a massa de água do nó; $\partial T_{nó}$ é a variação da temperatura da água do nó; ∂t é o intervalo de tempo; \dot{m}_{ent} é o fluxo de água que entra pelo fundo do nó e T_{ent} a sua temperatura; \dot{m}_{sai} é o fluxo de água que sai pelo topo do nó e T_{sai} a sua temperatura; UA é o coeficiente de perda do depósito; \dot{Q}_{BC} é o calor fornecido pela bomba de calor; \dot{Q}_{aux} é o calor fornecido pela resistência da bomba de calor e, por fim, T_{ag} é a temperatura a que a água entra no depósito.

A variação da temperatura da água afeta vários dos seus parâmetros e propriedades, como é o caso do calor específico da água (c_p), mas, de forma a facilitar os cálculos e tendo em conta que a sua variação teria pouco impacto nos balanços, assume-se o seu valor como constante, definindo o seu valor para uma temperatura de 25°C [40]. O pressuposto de que a variação da temperatura da água não altera de forma significativa as suas restantes propriedades também é essencial para manter o sistema linear, podendo desprezar-se a variação de densidade consequente da variação da temperatura e assumir que existe sempre a mesma massa de água no depósito.

Visto que o volume de água no depósito se mantém inalterado durante todos os momentos, isto é, o volume do depósito encontra-se sempre preenchido por água, a quantidade de água que sai num determinado intervalo de tempo é igual à quantidade de água que entra nesse mesmo intervalo, logo:

$$\dot{m}_{ent} = \dot{m}_{sai} \quad (34)$$

Como o depósito apenas possui um ponto de entrada e um ponto de saída de água (na base e no topo, respetivamente) o valor de f_i^s será 0 para equações de todos os nós, exceto para o nó do topo para o qual tem o valor 1. De forma análoga, f_i^e terá o valor 0 nas equações de todos os nós, exceto no nó da base onde assumirá o valor 1. Assim sendo, a expressão do método implícito toma a seguinte forma:

$$\begin{aligned} m_{nó} c_p \left(\frac{T_{nó}^{t+1} - T_{nó}^t}{\Delta t} \right) \\ = \dot{m}_{ent} c_p T_{nó-1}^{t+1} - \dot{m}_{sai} c_p T_{nó}^{t+1} - UA(T_{nó}^{t+1} - T_{amb}^{t+1}) + \dot{Q}_{BC} + \dot{Q}_{aux} \\ + f_i^e \dot{m}_{ent} c_p T_{ag} - f_i^s \dot{m}_{sai} c_p T_{nó}^{t+1} \end{aligned} \quad (35)$$

Dado que o modelo apenas admite movimentos de massa no sentido ascendente, a equação de energia é escrita da seguinte forma:

$$\begin{aligned}
T_{n\acute{o}-1}^{t+1}(-\dot{m}_{ent}c_p) + T_{n\acute{o}}^{t+1} \left(\frac{m_{n\acute{o}}c_p}{\Delta t} + \dot{m}_{sai}c_p + UA + f_i^s \dot{m}_{sai}c_p \right) \\
= \frac{m_{n\acute{o}}c_p T_{n\acute{o}}^t}{\Delta t} + UA.T_{amb}^{t+1} + \dot{Q}_{BC} + \dot{Q}_{aux} + f_i^e \dot{m}_{ent}c_p T_{ag}
\end{aligned} \tag{36}$$

Podemos assim formar uma matriz A ($n \times n$), em que n é o número de nós do depósito e representa os coeficientes das incógnitas. A matriz B contém os termos independentes destas equações.

$$A(n, n - 1) = (-\dot{m}_{ent}c_p) \tag{37}$$

$$A(n, n) = \left(\frac{m_{n\acute{o}}c_p}{\Delta t} + \dot{m}_{sai}c_p + UA + f_i^s \dot{m}_{sai}c_p \right) \tag{38}$$

$$B(n, 1) = \left(\frac{m_{n\acute{o}}c_p T_{n\acute{o}}^t}{\Delta t} + UA.T_{amb}^{t+1} + \dot{Q}_{BC} + \dot{Q}_{aux} + f_i^e \dot{m}_{ent}c_p T_{ag} \right) \tag{39}$$

No caso do nó superior não existe $A(n, n - 1)$ pois não existe nenhum nó acima deste.

Tendo em conta que o sistema é formado por equações lineares, é possível resolvê-lo utilizando o algoritmo da eliminação de Gauss-Jordan, encontrando-se assim o valor das incógnitas da matriz, ou seja, as temperaturas de cada nó.

Quando a bomba de calor se encontra em funcionamento, o calor transferido pelo condensador (\dot{Q}_{BC}) é apenas dividido pelos nós que vão desde a posição do permutador até ao topo do depósito. No caso de algum dos nós se encontrar a uma temperatura superior à temperatura máxima definida pelo controlador, esse nó deixa de ser aquecido, assim como todos os nós que se encontram acima desse.

3.5. Modelo da Bomba de Calor

As equações que permitem modelar o funcionamento da bomba de calor são retiradas do trabalho de Facão & Carvalho [23], permitindo simular os seus balanços de energia dependentes de uma variedade de parâmetros, como são o caso da radiação, da hora do dia, T_{amb} , entre outros.

Como o evaporador da bomba de calor é definido como sendo um coletor solar sem cobertura, tem a capacidade de absorver calor de condensação quando a sua temperatura é inferior à temperatura de orvalho do ar exterior. A seguinte fórmula permite calcular a temperatura de orvalho (T_{or}) em função da T_{amb} e da HR [41]:

$$T_{or}(T_{amb}, HR) = \frac{\lambda \cdot \left(\ln \left(\frac{HR}{100} \right) + \frac{\beta \cdot T_{amb}}{\lambda + T_{amb}} \right)}{\beta - \left(\ln \left(\frac{HR}{100} \right) + \frac{\beta \cdot T_{amb}}{\lambda + T_{amb}} \right)} \quad (40)$$

Em que λ e β são constantes.

Isto permite calcular a pressão de saturação (P_s), quer para a T_{or} que para a temperatura do evaporador (T_e) [42].

$$P_s(T) = 10^2 \cdot \exp \left(19,016 - \frac{4064,95}{T + 236,25} \right) \quad (41)$$

Utilizando a seguinte equação obtém-se o calor contribuído pelo efeito de condensação ($\dot{Q}_{condensação}$) [43]:

$$\dot{Q}_{condensação} = 1.357 \times A \times (b_2 + c_2 \times u_{vento}) \times (P_s(T_{or}) - P_s(T_e)) \quad (42)$$

Em que b_2 e c_2 são constante. Caso $T_e > T_{or}$, então $\dot{Q}_{condensação} = 0$. Por problemas de convergência foi definido um limite superior para o calor de condensação de 250W.

Para se fazer o balanço da radiação global no evaporador (G_{net}) é necessário quantificar a emissividade do céu (ε_s) e a radiação de grande comprimento de onda (E_L) [43]:

$$\varepsilon_s = 0,711 + 0,56 \times \frac{T_{or}}{100} + 0,73 \times \left(\frac{T_{or}}{100} \right)^2 \quad (43)$$

$$E_L = \varepsilon_s \sigma (T_{amb} + 273,15)^4 (1 + \cos \beta) / 2 \quad (44)$$

$$G_{net} = I_g + 0,85(E_L - \sigma(T_{amb} + 273,15)^4) \quad (45)$$

Em que β é a inclinação do coletor solar termodinâmico. Depois de calculados o $\dot{Q}_{condensação}$ e o balanço radiativo do evaporador a seguinte equação permite determinar o fluxo de energia do evaporador (\dot{Q}_{evap}) [23]:

$$\dot{Q}_{evap} = \dot{Q}_{condensação} + G_{net}A\eta_0(1 - b_u u_{vento})MAI - A[(b_2 + c_2 u_{vento})(T_e - T_{amb})] \quad (46)$$

Através dos dados fornecidos pelo fabricante relativamente ao compressor, é possível calcular o calor libertado pelo fluido no condensador (\dot{Q}_{cond}) e o trabalho transferido pelo compressor (\dot{W}_{comp}), em função da T_e e da temperatura do condensador (T_c) [23]:

$$\dot{Q}_{cond} = a + bT_e + cT_e^2 + dT_c + eT_eT_c + fT_e^2T_c \quad (47)$$

$$\dot{W}_{comp} = a_1 + b_1T_e + c_1T_e^2 + d_1T_c + e_1T_eT_c + f_1T_e^2T_c \quad (48)$$

No entanto, esta não é a única forma de calcular o \dot{Q}_{cond} . Através do coeficiente global de transferência de calor do condensador (UA_{cond}) e a diferença de temperaturas entre o fluido no condensador e a temperatura da água no tanque sabe-se essa potência [23]:

$$\dot{Q}_{cond} = UA_{cond}(T_c - T_{ag}) \quad (49)$$

Relacionando estes fluxos obtém-se o seguinte balanço de energia [23]:

$$\dot{Q}_{cond} = \dot{W}_{comp} + \dot{Q}_{evap} - UA_{comp}(T_c - T_{ar}) \quad (50)$$

Como o último elemento da equação é pequeno relativamente aos restantes, é retirado de forma a facilitar a computação do programa.

Por outro lado, devido a problemas de convergência do sistema em algumas iterações, foi feita uma análise de regressão linear múltipla de forma a obter equações lineares para as correlações $T_e - T_c - \dot{Q}_{cond}$ e $T_e - T_c - \dot{W}_{comp}$, estudando as curvas da ficha técnica do compressor:

$$\dot{Q}_{cond} = a_3 + b_3T_e + c_3T_c + d_3T_eT_c \quad (51)$$

$$\dot{W}_{comp} = a_4 + b_4T_e + c_4T_c + d_4T_eT_c \quad (52)$$

Tabela 12 – Valores das constantes das equações (50) e (51)

a_3	b_3	c_3	d_3
2182,64	82,313	-11,964	-0,5064
a_4	b_4	c_4	d_4
167,74	-7,227	4,854	0,1728

Para resolver o sistema formado pelas equações (46) e (49) a (52) foi utilizado o método de Newton-Raphson, que resolve uma matriz 5x6 cujas cinco primeiras colunas são constituídas pelos coeficientes das incógnitas e a última coluna pelos termos independentes. As incógnitas deste sistema são: T_e , T_c , \dot{Q}_{cond} , \dot{W}_{comp} e \dot{Q}_{evap} .

3.6. Funcionamento da Aplicação

3.6.1. Sub-rotinas e *Namespace*

No Visual Basic, o procedimento “Sub” consiste numa série de instruções. Quando é chamado este procedimento não retorna valores, limitando-se a executar as tarefas ordenadas depois da declaração *Sub* e terminando com a declaração *End Sub*, *Sub End* ou *Return*. Uma sub-rotina pode conter argumentos (como constantes e variáveis) ou expressões que lhe são passadas pelo código de chamada.

Sub-rotina ReDimData – A partir do ficheiro Excel da localidade escolhida pelo utilizador importa os dados climáticos relevantes para a aplicação. Uma vez que os valores importados são horários a sub-rotina calcula novos valores com intervalos de cem segundos através de interpolação linear. A seguir, calcula o ângulo de incidência dos raios solares no coletor para cada instante da simulação e a respetiva radiação incidente.

Sub-rotina gaussJ – Calcula a solução de uma matriz de equações lineares utilizando o método de eliminação de Gauss-Jordan.

Sub-rotina setQaux – Verifica se a temperatura da água que está a ser consumida respeita os valores exigidos pela norma EN 16147:2011 e, caso esses valores estejam em incumprimento, calcula a potência auxiliar necessária para manter o intervalo de temperaturas desejado.

Sub-rotina setQdep – Caso a bomba de calor esteja ligada, avalia a temperatura dos nós para garantir que nenhum nó acima do nó da sonda do controlador tenha uma temperatura superior a este e impede que a temperatura máxima definida pelo controlador seja ultrapassada. Fá-lo dividindo o calor do condensador pelo nó da sonda e os nós superiores à sonda, desde que estejam abaixo da temperatura definida. Caso encontre um nó com temperatura superior ao limite não o aquece, aquecendo apenas desde a sonda até aos nós imediatamente abaixo deste.

Sub-rotina setCiclo – Avalia o ciclo de consumo escolhido pelo utilizador e define o caudal de extração exigido pela norma EN 16147:2011 para o respetivo tipo de consumo. A seguir avalia se com esse caudal a energia extraída é inferior à desejada. Caso seja inferior, é contabilizada a energia extraída e o caudal é mantido para o intervalo de tempo seguinte, até que a energia de extração exigida para o tipo de consumo seja atingida. No caso de ser superior à desejada, o caudal é redefinido para que naquele intervalo de tempo a energia extraída seja igual à desejada para o tipo de consumo em questão.

Sub-rotina CicloBC – Simula o funcionamento da bomba de calor fazendo uso dos parâmetros descritos no trabalho de Facão & Carvalho [23]. Começa por calcular T_{or} , $P_s(T_{or})$, ε_s , E_L , G_{net} e o modificador de ângulo incidente (MAI). Posteriormente, através do método de Newton-Raphson, e usando a sub-rotina “gaussJ” define-se para aquele instante o valor do calor do condensador e do evaporador, e as respetivas temperaturas assim como o trabalho do compressor.

Sub-rotina NosDep – Define a temperatura de todos os nós do depósito em cada instante da simulação. Contém um ciclo *for* para todas os instantes do ano, que começa por avaliar a hora do dia e definir o intervalo de tempo da iteração nesse instante. Depois chama a sub-rotina “setCiclo” que define o valor do caudal de extração e a sub-rotina “setQdep” que divide o calor do condensador pelos vários nós. A seguir, com recurso à sub-rotina “gaussJ” calcula a temperatura em cada nó do depósito e chama a sub-rotina “setQaux” para avaliar se a temperatura no nó de extração respeita a norma EN 16147:2011. Consequentemente, calcula o calor que a resistência elétrica necessita fornecer para que a norma seja cumprida. Posteriormente, tendo em conta o modelo escolhido, é definido o intervalo de temperaturas de funcionamento do controlador para o instante simulado e é analisada a temperatura do nó da sonda do controlador. Caso a temperatura esteja fora dos limites definidos pelo controlador é chamada a sub-rotina “CicloBC”, que simula o funcionamento da bomba de calor naquele instante e define os valores do calor do condensador e do consumo do compressor. Esta sub-rotina possui contadores que contabilizam a energia anual consumida pelo compressor e pela resistência elétrica, as perdas térmicas, a energia extraída para consumo e o calor fornecido pelo

condensador, calculando também o SPF anual e mensal, assim como a energia renovável (Eren) anual e mensal.

Os *namespaces* organizam objetos evitando ambiguidade e simplificando referências quando são usados grandes grupos de objetos, como é o caso das bibliotecas de classes. As classes são uma forma de encapsular sub-rotinas e funções num único objeto, para que o código se mantenha organizado e não seja repetitivo.

Namespace CicloConsumos – Agrupa quatro classes (CicloS, CicloM, CicloL, CicloXL) que traduzem para a linguagem do Visual Basic a **Tabela 8** e as tabelas do **Anexo I**, de forma a que a caracterização dos consumos possa ser usada pela sub-rotina “setCiclo”.

3.6.2. Visão Geral da Aplicação

O programa inicialmente apresenta uma interface (**Figura 7**) onde o utilizador poder escolher a localidade para a qual pretende fazer a simulação, a bomba de calor que deseja simular, bem como um dos ciclos de consumo disponíveis (**Diagrama 1**). A seleção da localidade define qual o ficheiro Excel de onde são retirados os dados climáticos; a escolha da bomba de calor define as variáveis correspondentes aos seus parâmetros de funcionamento; e a escolha do ciclo de consumo define os instantes em que existe extração e o seu caudal (m_dot_L) e energia (joulaador). No entanto, existem alguns parâmetros que se encontram definidos desde o início do programa e que não podem ser alterados, como o número de nós do depósito (nos = 6) e os intervalos de tempo (de uma hora entre as 22:00 e as 7:00 e de cem segundos das 7:00 até às 22:00).

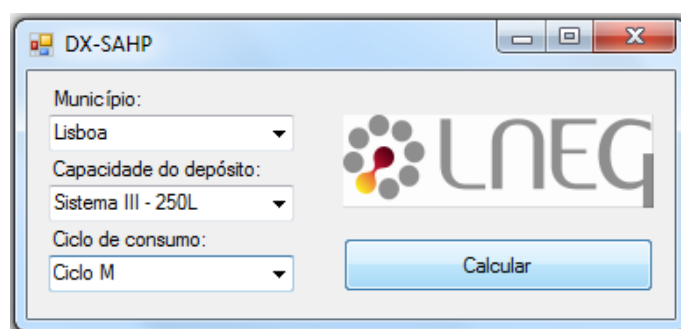


Figura 7 – Seleção da simulação a realizar pela aplicação

Ao iniciar a simulação, o programa começa por importar os dados do ficheiro Excel da localidade escolhida e seguidamente redimensiona-os por interpolação linear para um vetor que

respeite os intervalos de tempo definidos, correndo a sub-rotina “reDimData”. Uma vez definido o vetor I_{dir} , a sub-rotina calcula $I_{dir\beta}$ e $I_{g\beta}$. Quando “reDimData” chega ao fim, inicia-se a sub-rotina “NosDep”, representada no **Diagrama 2**, que começa por correr outra sub-rotina – “setCiclo” – definindo o valor do caudal de saída dependendo do ciclo de consumo escolhido e da energia extraída até esse instante (contakWh). Caso a bomba de calor esteja ligada (controlo = true), é chamada a sub-rotina “setQdep” que divide a potência do permutador do condensador (Qdotcond) pelos nós selecionados (Qdep), segundo os critérios definidos pela sub-rotina. Em seguida é simulado o funcionamento do depósito, calculando as temperaturas nos nós (Ts) através das equações do depósito usando outra sub-rotina – “gaussj” – que resolve o sistema de equações lineares utilizando o método da eliminação de Gauss-Jordan. Caso a temperatura no nó do depósito onde se encontra a sonda do controlador seja superior à temperatura máxima definida pelo mesmo (difSup) a bomba de calor é desligada (controlo = false). No entanto, se for inferior à temperatura mínima definida (difInf), a bomba de calor é ligada e é chamada a sub-rotina “CicloBC”. Esta simula o funcionamento da bomba de calor resolvendo um sistema de equações através do método de Newton-Raphson e definindo o calor do condensador que é transmitido à água no depósito, assim como a potência consumida pelo compressor (Wdotcomp). Se este calor não for suficiente para aquecer a água à temperatura desejada é considerado um apoio elétrico em série (Qaux) com o sistema, contabilizado pela sub-rotina “setQaux”. Ao chegar ao fim, a sub-rotina “NosDep” volta a iniciar-se para o instante seguinte, durante os 200385 instantes definidos.

Por fim é apresentado um gráfico com os valores de SPF e Eren e uma janela com os valores da energia anual consumida pelo compressor (contWdotcomp) e apoio (contQaux), assim como a energia anual fornecida pelo condensador (contQdotcond), a energia anual consumida (contEner) e as perdas térmicas no depósito (contPT), como representado pela **Figura 8**.

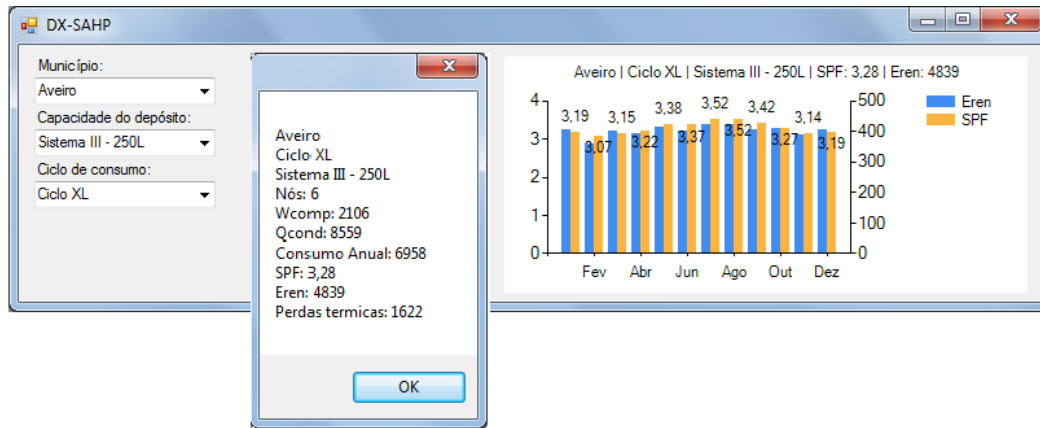


Figura 8 – Resultado da simulação (exemplo)

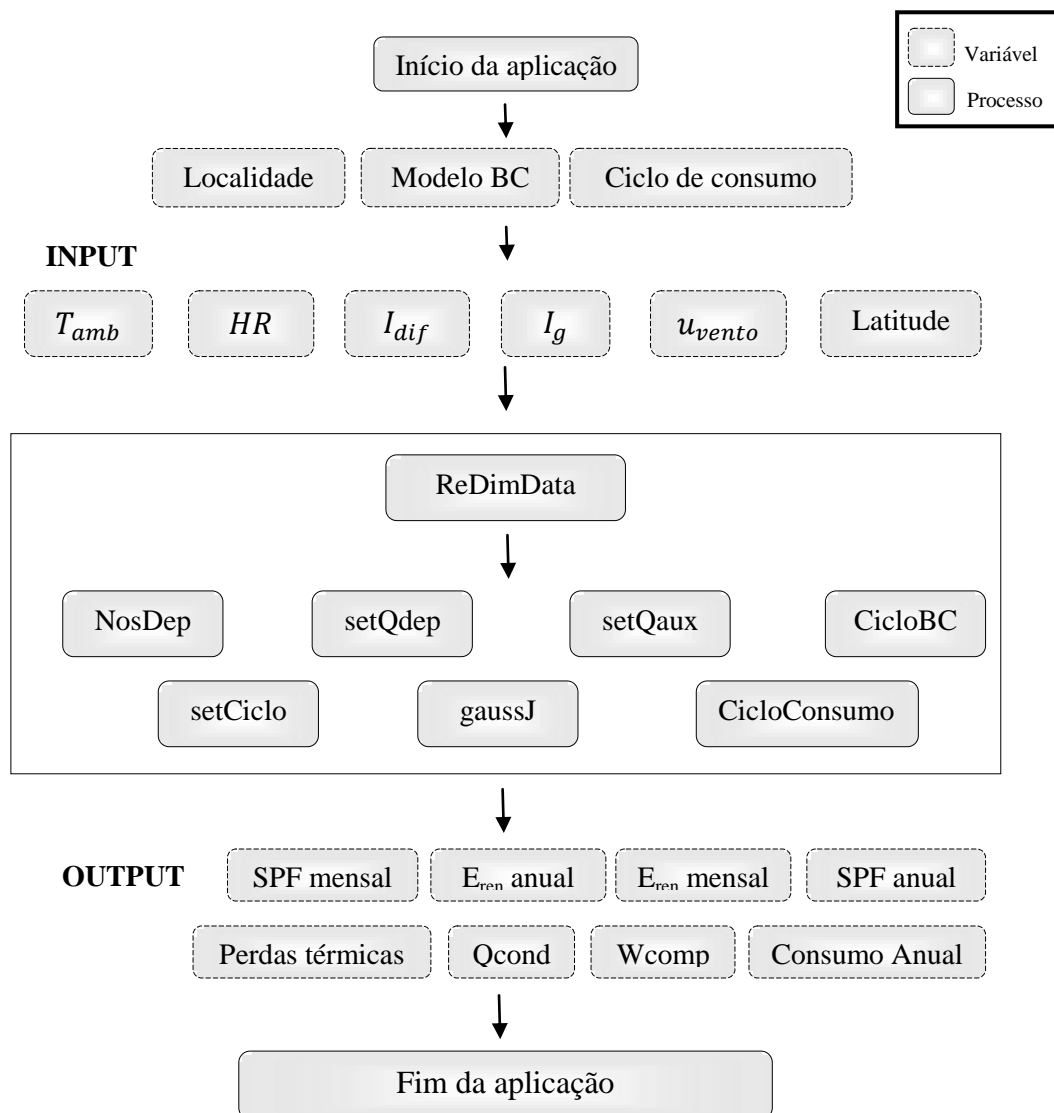


Diagrama 1 – Funcionamento geral da aplicação

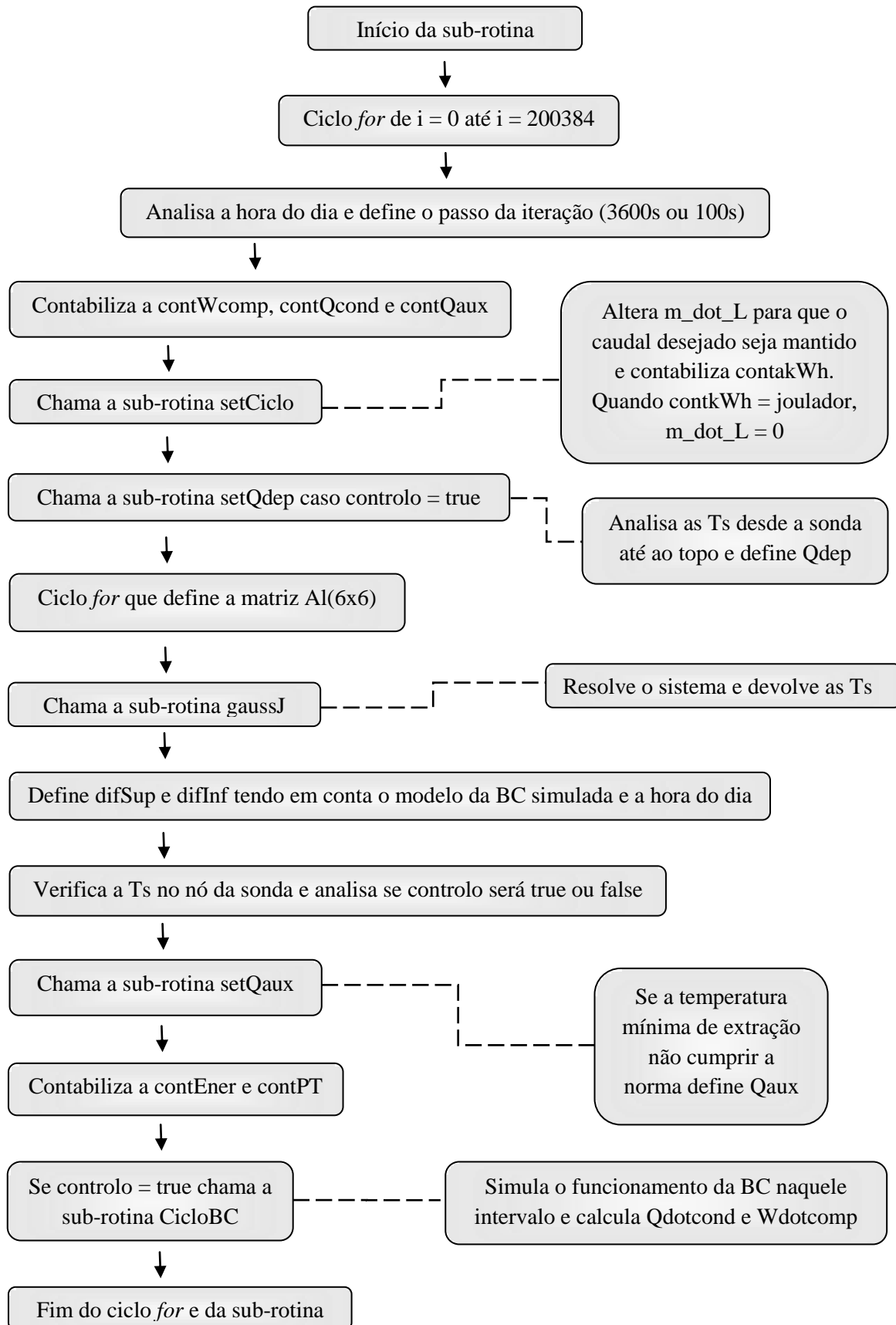


Diagrama 2 – Sub-rotina NosDep

Capítulo 4 – Resultados

A análise realizada neste capítulo tem como objetivo estudar a viabilidade dos resultados obtidos através da aplicação desenvolvida, comparando-os com os resultados obtidos no LNEG com base numa simulação do sistema utilizando o programa TRNSYS e a caracterização experimental dos sistemas de acordo com a metodologia expressa em [23].

Não é possível antecipar com exatidão o valor da energia extraída durante um determinado intervalo de tempo, dado que o modelo de equações do depósito demonstra que o caudal de extração num intervalo de tempo influencia a temperatura da água de saída do depósito. Contudo, a diferença entre a energia que deveria ser extraída segundo a EN 16147:2011 e a energia extraída pela simulação é muito pequena, sendo inferior a 1% quando comparados os valores da energia útil anual obtidos no LNEG com os da aplicação.

A análise gráfica dos resultados mensais do SPF foi feita em maior detalhe para as localidades onde se verificou o maior (Ponta Delgada) e o menor (Viseu) SPF, assim como a maior (Beja) e a menor (Funchal) radiação direta anual.

Sistema I – 200L

O mês de agosto destaca-se como o mês com maior SPF para as cidades vistas em detalhe, quer na aplicação desenvolvida quer nos resultados anteriormente obtidos no LNEG. Os valores são coincidentes para Ponta Delgada – 3,37 – e a maior diferença observada com a aplicação foi de -1% para Viseu. Por outro lado, em ambos os trabalhos verificou-se que, com exceção de Ponta Delgada, o SPF mais baixo em dezembro. Na região autónoma dos Açores verificou-se também a maior diferença obtida com a aplicação (2,4%) (**Gráfico 2**).

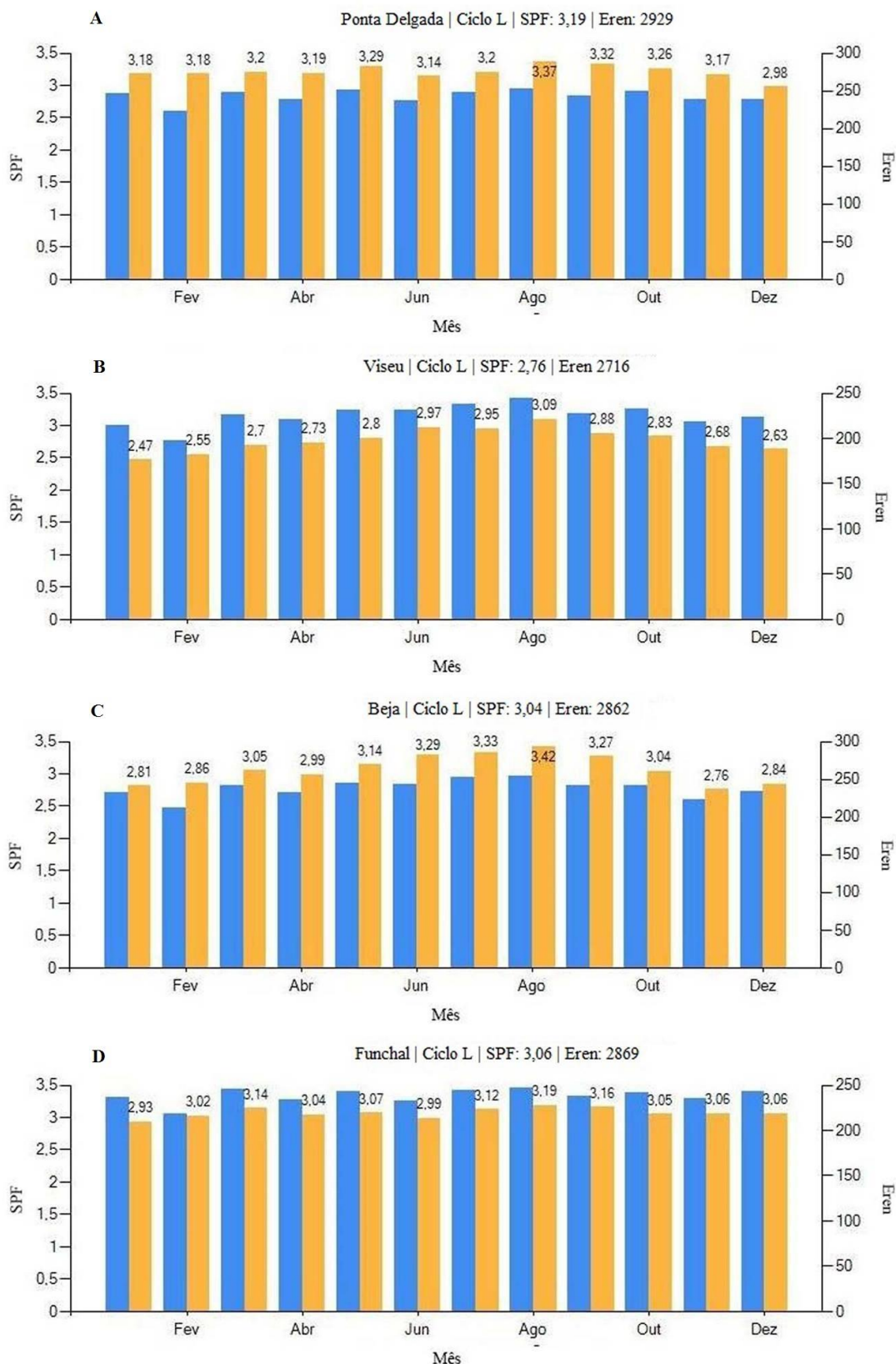


Gráfico 2 – SPF mensal calculado pela aplicação para o sistema I (SPF a amarelo e Eren a azul). A – Ponta Delgada; B – Viseu; C – Beja; D – Funchal

Relativamente à diferença de amplitude entre os meses com maior e menor SPF, verificou-se que esta era mais acentuada nos resultados anteriormente obtidos no LNEG do que nos resultados da aplicação agora desenvolvida (**Figura 9**). As divergências foram maiores para as localidades de Aveiro, Coimbra e Portalegre (-21,3%, -19,2% e -19,2%, respetivamente) e menores para as cidades do Funchal, Amarante e Beja (-3,7%, -5,7% e -6,8%, respetivamente).

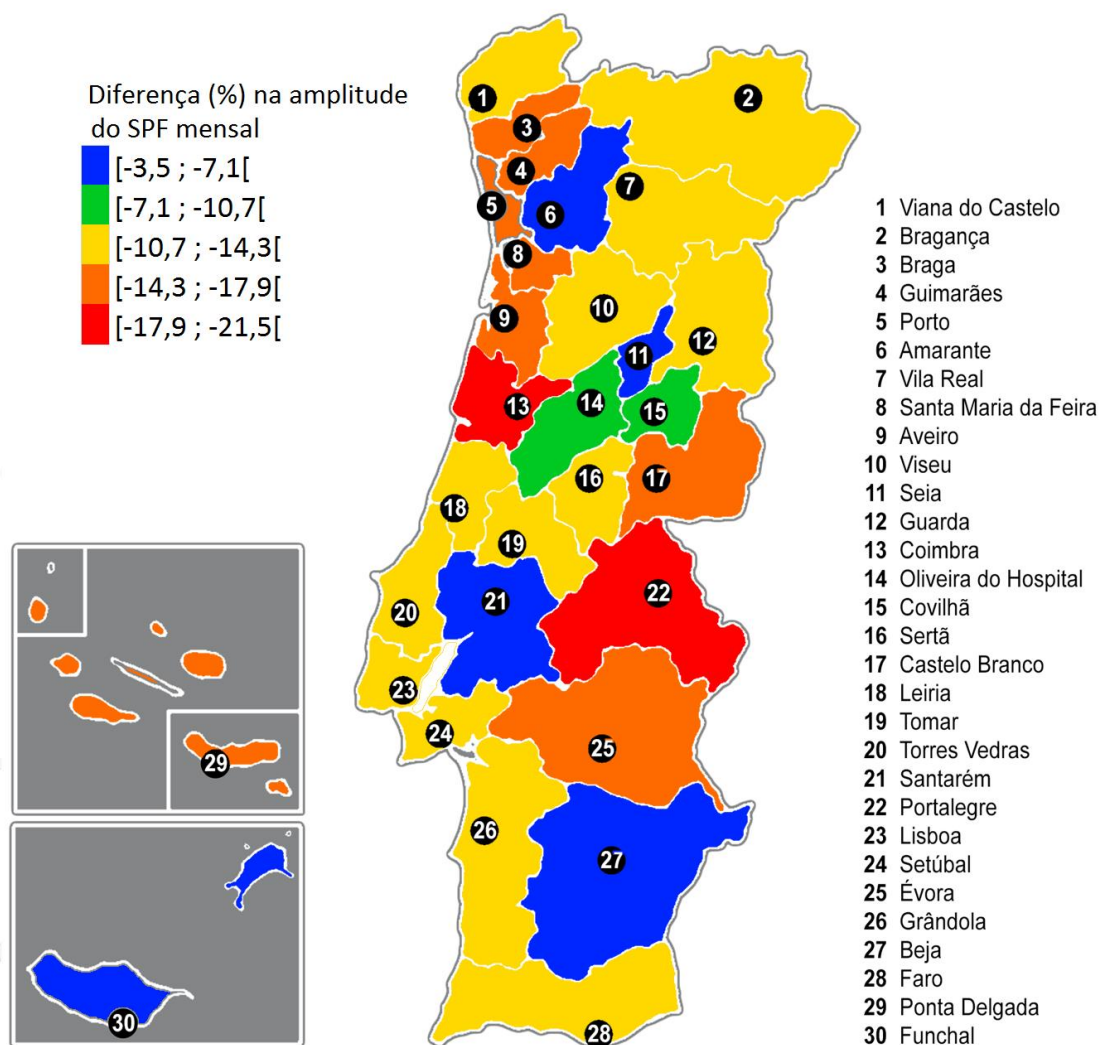


Figura 9 – Diferença de amplitude entre os meses como maior e menor SPF (Sistema I)

Quanto aos valores anuais do SPF obtidos pela aplicação, verificou-se que estes variam entre 3,19 em Ponta Delgada e 2,76 em Viseu, sendo expeável que na primeira região sejam produzidos anualmente 2929 kWh de origem renovável, sendo que para a região Dão-Lafões cerca de 2716 kWh (**Tabela 13**).

Tabela 13 – Resultados da simulação (Sistema I)

Localidade	SPF - LNEG	SPF	E_{ren}
Viana do Castelo	2,78	2,78	2728
Bragança	2,87	2,91	2798
Braga	2,77	2,78	2730
Guimarães	2,80	2,81	2747
Porto	2,85	2,86	2771
Amarante	2,79	2,78	2731
Vila Real	2,87	2,89	2787
Santa Maria da Feira	2,78	2,78	2731
Aveiro	2,85	2,85	2769
Viseu	2,76	2,76	2716
Seia	2,79	2,77	2726
Guarda	2,81	2,83	2756
Coimbra	2,82	2,83	2754
Oliveira do Hospital	2,81	2,81	2745
Covilhã	2,81	2,79	2734
Sertã	2,82	2,82	2752
Castelo Branco	2,94	2,93	2807
Leiria	2,88	2,91	2798
Tomar	2,82	2,83	2755
Torres Vedras	2,95	2,97	2827
Santarém	2,92	2,94	2811
Portalegre	2,98	2,98	2832
Lisboa	2,98	2,98	2832
Setúbal	2,93	2,92	2803
Évora	2,98	2,98	2834
Grândola	2,92	2,93	2807
Beja	3,03	3,04	2862
Faro	3,00	2,99	2836
Ponta Delgada	3,14	3,19	2929
Funchal	3,03	3,06	2869

As localidades onde as diferenças de valores são menores situam-se maioritariamente no sul do país. Os valores obtidos pela aplicação para o SPF anual estão bastante próximos dos valores anteriormente obtidos no LNEG, apresentando uma variação máxima de 1,3% para Seia e Braga e sendo igual para as localidades de Santarém, Lisboa, Setúbal e Grândola (**Figura 10**).

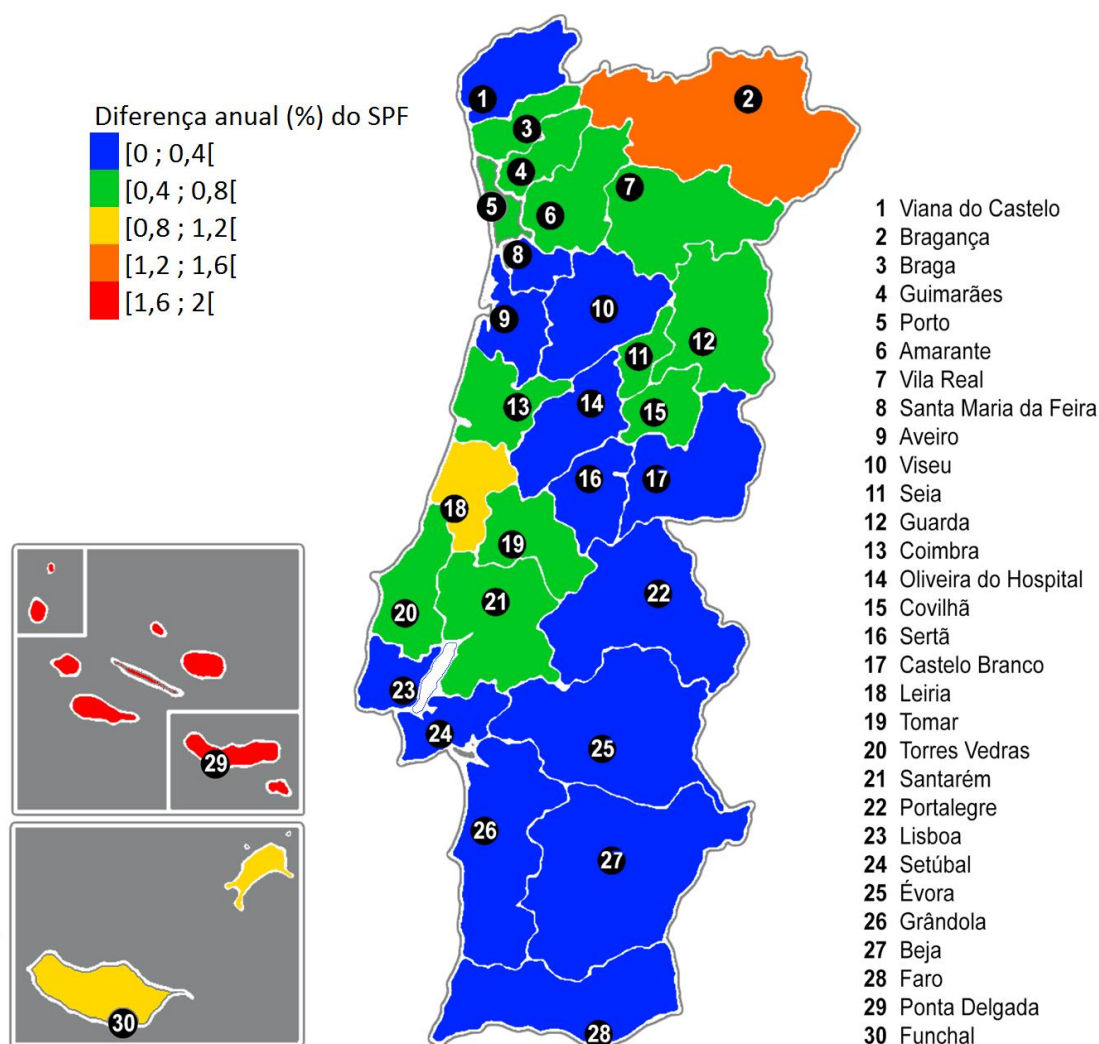


Figura 10 – Diferença entre os valores do SPF anual (Sistema I)

Sistema II – 250L

Em ambos os trabalhos verificou-se que para as quatro cidades escolhidas o mês com maior SPF é agosto e o mês com menor SPF é janeiro, com exceção de Ponta Delgada que tem em dezembro o valor mais baixo (**Gráfico 3**). Comparando os valores do mês de agosto obtidos pela aplicação com os anteriormente obtidos pelo LNEG, verificou-se para Viseu a maior diferença (-4,1%), e para o mês com SPF mais baixo a maior diferença foi de 7,7% também para Viseu.

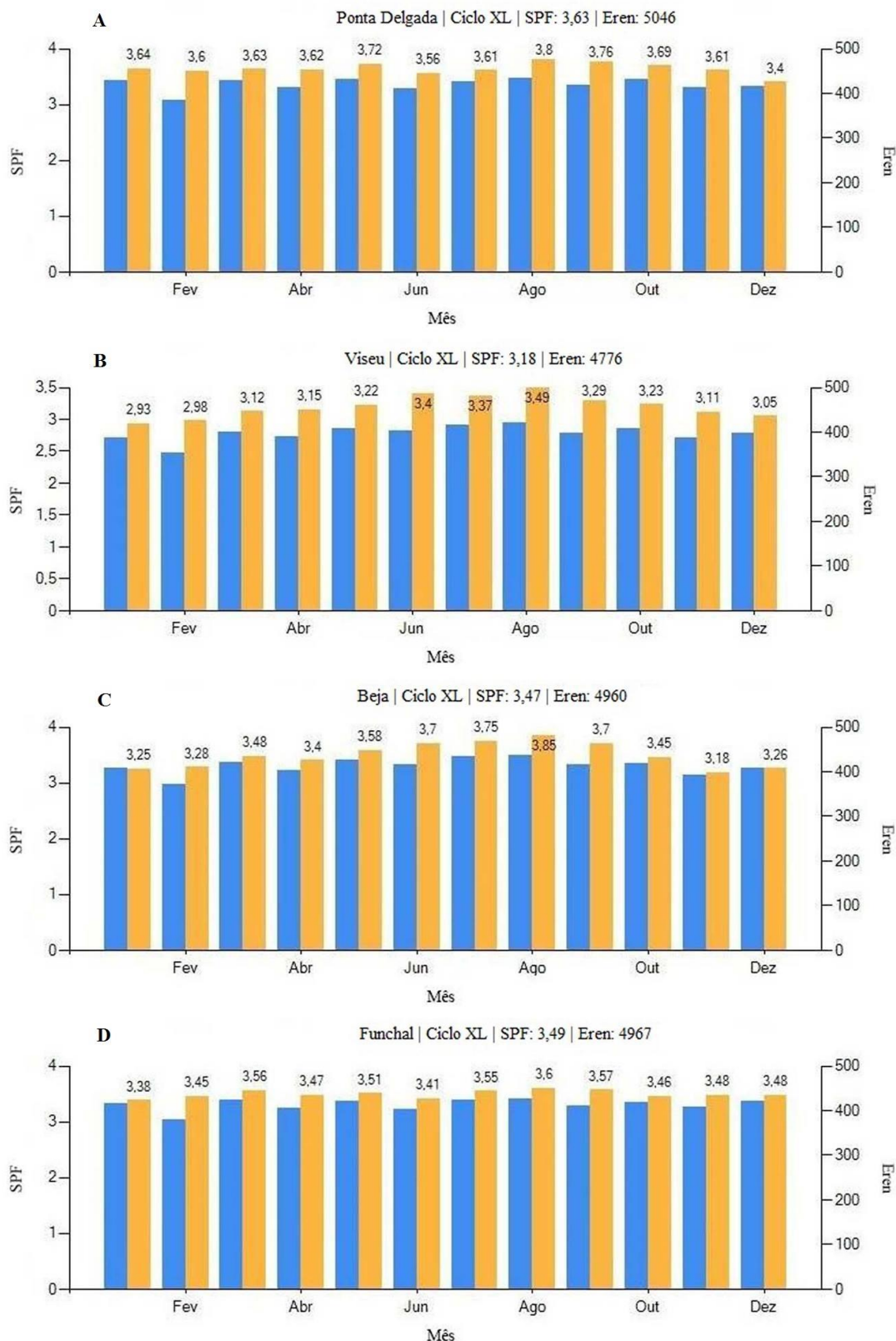


Gráfico 3 – SPF mensal calculado pela aplicação para o sistema II (SPF a amarelo e Eren a azul). A – Ponta Delgada; B – Viseu; C – Beja; D – Funchal

No que diz respeito ao valor máximo e mínimo do SPF mensal para uma localidade verificou-se que a sua diferença é menor nos resultados obtidos pela aplicação comparativamente com os valores do ensaio experimental, sendo que as maiores variações entre os dois métodos se registaram para as localidades de Viseu, Coimbra e Amarante (-45,1%, -44,6% e -41,7%, respetivamente) e as menores variações em Aveiro, Beja e Seia (-18,2%, -23,9% e -26,4%, respetivamente) (**Figura 11**).

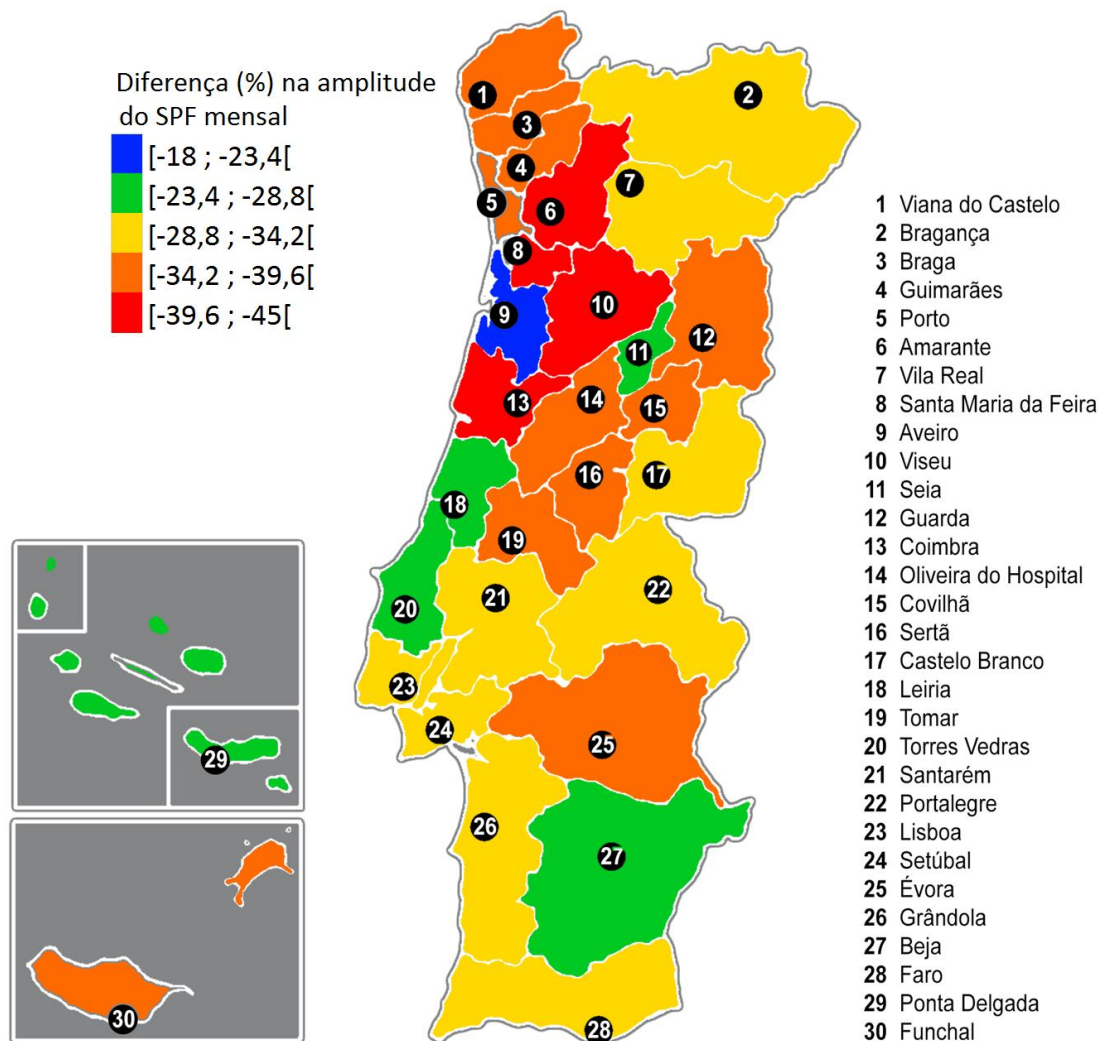


Figura 11 – Diferença de amplitude entre os meses como maior e menor SPF (Sistema II)

As localidades com maior SPF anual são Ponta Delgada (3,63), Funchal (3,49) e Beja (3,47), tendo Viseu (3,18) o SPF mais baixo, seguido de Viana do Castelo, Braga, Amarante, Santa Maria da Feira e Seia (todas com 3,21). A energia anual proveniente de fonte renovável para este sistema, representada na Tabela 14, varia entre 5046 e 4776 kWh.

Tabela 14 – Resultados da simulação (Sistema II)

Localidade	SPF - LNEG	SPF	E_{ren}
Viana do Castelo	3,18	3,21	4794
Bragança	3,31	3,34	4882
Braga	3,17	3,21	4795
Guimarães	3,21	3,24	4816
Porto	3,25	3,29	4845
Amarante	3,18	3,21	4797
Vila Real	3,29	3,32	4865
Santa Maria da Feira	3,18	3,21	4797
Aveiro	3,27	3,28	4839
Viseu	3,15	3,18	4776
Seia	3,17	3,21	4794
Guarda	3,22	3,26	4830
Coimbra	3,23	3,25	4820
Oliveira do Hospital	3,22	3,24	4814
Covilhã	3,21	3,22	4801
Sertã	3,23	3,25	4821
Castelo Branco	3,37	3,35	4889
Leiria	3,31	3,34	4878
Tomar	3,23	3,25	4824
Torres Vedras	3,39	3,40	4914
Santarém	3,36	3,36	4893
Portalegre	3,42	3,41	4920
Lisboa	3,41	3,41	4925
Setúbal	3,35	3,35	4885
Évora	3,42	3,41	4924
Grândola	3,36	3,36	4891
Beja	3,49	3,47	4960
Faro	3,43	3,42	4926
Ponta Delgada	3,61	3,63	5046
Funchal	3,45	3,49	4967

Analisando os valores do SPF anual obtidos pela aplicação, verificou-se que estão bastante próximos dos anteriormente obtidos pelo LNEG para o mesmo sistema, coincidindo várias vezes e tendo como resultado menos semelhante o da localidade de Ponta Delgada, com uma diferença relativa de 1,6%. As localidades onde as diferenças são menores situam-se maioritariamente no sul do país (**Figura 12**).

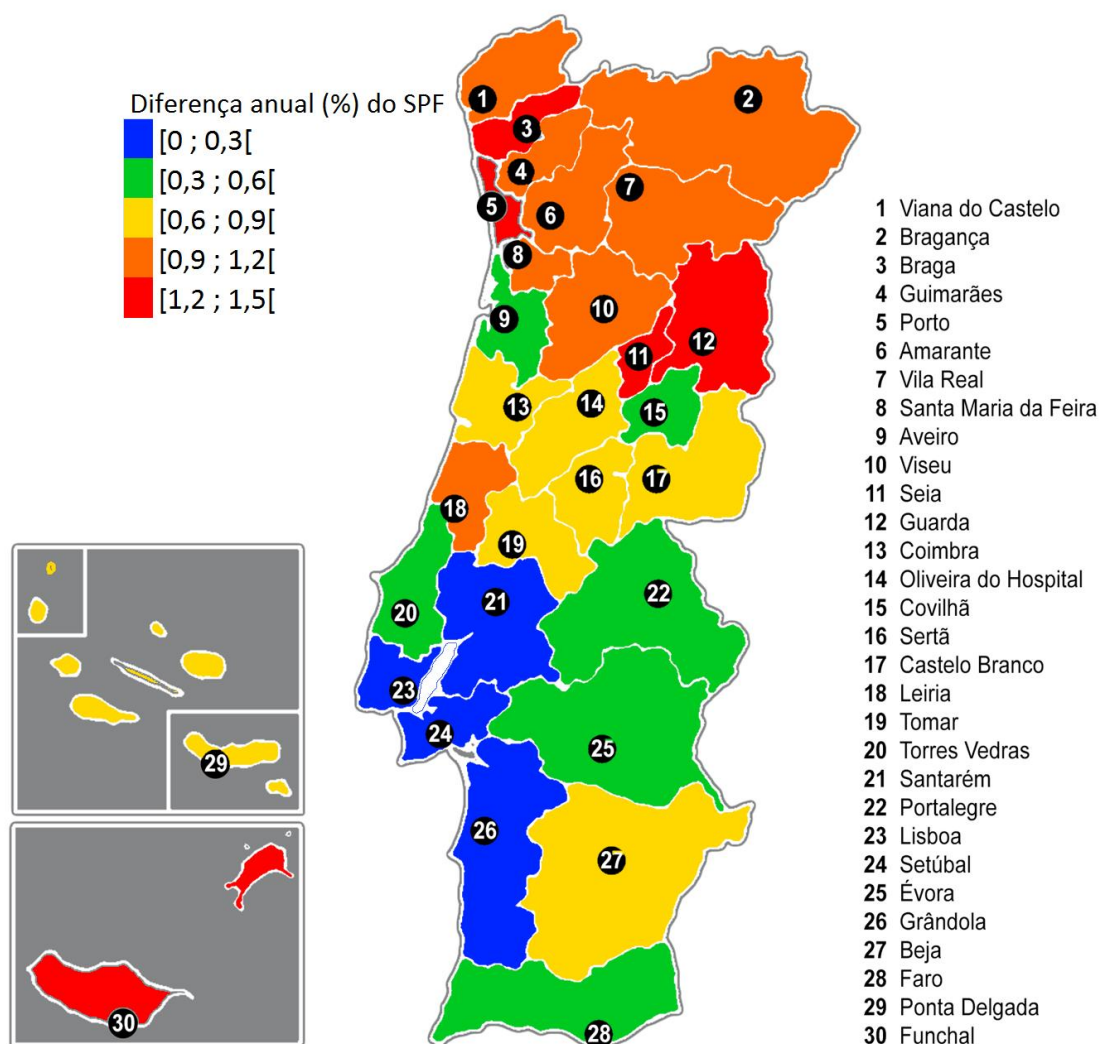


Figura 12 – Diferença entre os valores do SPF anual (Sistema II)

Sistema III – 300L

Analisando os resultados mensais para as localidades escolhidas, verificou-se que no mês com SPF mais elevado (agosto) a maior diferença entre os valores anteriormente obtidos pelo LNEG e da aplicação (Gráfico 4) é de 4,2% e no mês com SPF mais baixo (dezembro em Ponta Delgada e janeiro nas restantes) a maior diferença entre os valores obtidos através dos dois métodos é de -7,8%. Para ambos os SPF, menor e maior, as maiores diferenças foram observadas na região Dão-Lafões, representada por Viseu.

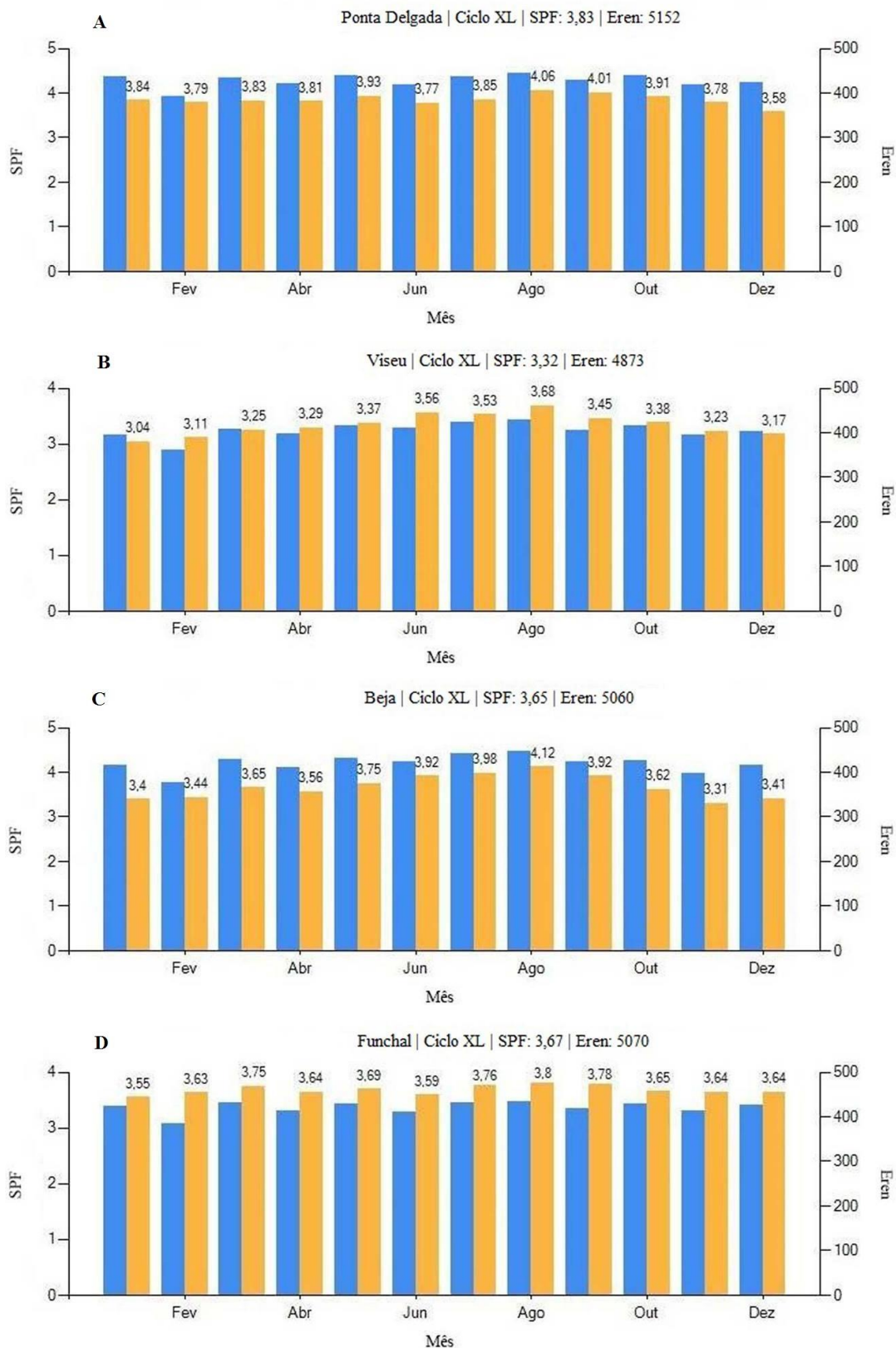


Gráfico 4 – SPF mensal calculado pela aplicação para o sistema III (SPF a amarelo e Eren a azul). A – Ponta Delgada; B – Viseu; C – Beja; D – Funchal

Relativamente aos valores máximo e mínimo do SPF mensal para uma localidade (**Figura 13**), é notório que a diferença entre os dois valores é sempre menor nas simulações da aplicação, tal como foi constatado nos sistemas anteriores. Os valores mais baixos registam-se nas localidades de Ponta Delgada, Beja e Torres Vedras (-15,8%, -16,5% e -24,4%, respetivamente) e os valores mais altos em Coimbra, Santa Maria da Feira e Sertã (-44,6%, -42,2%, -40,0%, respetivamente).

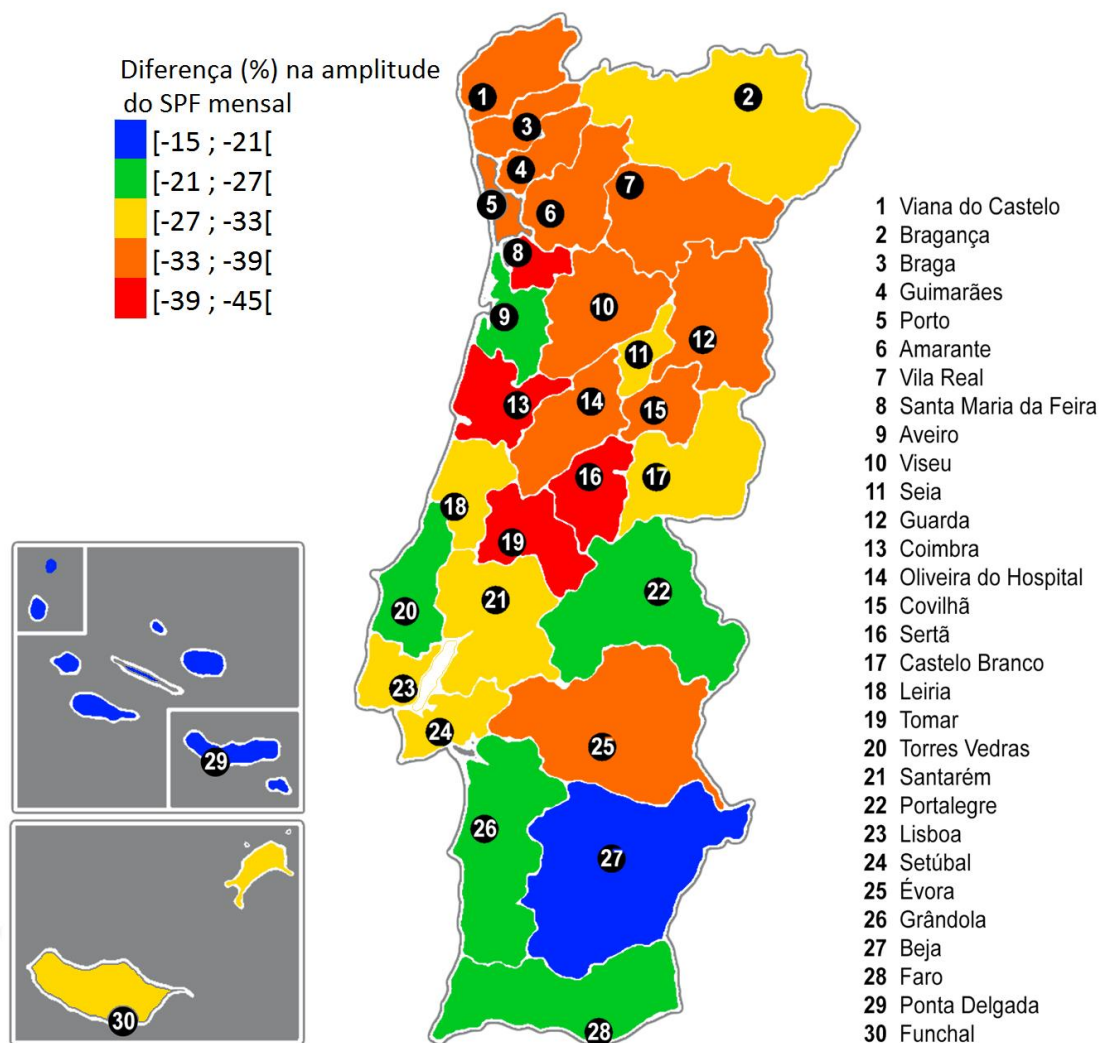


Figura 13 – Diferença de amplitude entre os meses como maior e menor SPF (Sistema III)

No que concerne o SPF anual, os valores mais elevados voltaram a registar-se nos arquipélagos dos Açores (3,83) e da Madeira (3,67), assim como no Baixo Alentejo (3,65); ficando no extremo oposto as localidades de Viseu (3,32), Viana do Castelo (3,35), Braga (3,35) e Seia (3,35). Para Ponta Delgada a energia anual proveniente de fonte renovável é de 5152 kWh, enquanto para Viseu é de 4873 kWh, como representado na **Tabela 15**:

Tabela 15 – Resultados da simulação (Sistema III)

Localidade	SPF - LNEG	SPF	E_{ren}
Viana do Castelo	3,33	3,35	4890
Bragança	3,46	3,50	4979
Braga	3,32	3,35	4893
Guimarães	3,37	3,39	4914
Porto	3,42	3,44	4946
Amarante	3,3	3,36	4897
Vila Real	3,45	3,47	4964
Santa Maria da Feira	3,33	3,36	4895
Aveiro	3,43	3,43	4938
Viseu	3,3	3,32	4873
Seia	3,32	3,35	4892
Guarda	3,37	3,41	4928
Coimbra	3,39	3,39	4918
Oliveira do Hospital	3,37	3,38	4912
Covilhã	3,36	3,36	4900
Sertã	3,38	3,39	4919
Castelo Branco	3,54	3,52	4990
Leiria	3,48	3,49	4977
Tomar	3,39	3,40	4923
Torres Vedras	3,57	3,56	5013
Santarém	3,53	3,52	4993
Portalegre	3,59	3,57	5021
Lisboa	3,6	3,58	5026
Setúbal	3,53	3,51	4986
Évora	3,59	3,58	5024
Grândola	3,53	3,52	4990
Beja	3,68	3,65	5060
Faro	3,62	3,59	5039
Ponta Delgada	3,82	3,83	5152
Funchal	3,66	3,67	5070

Comparativamente com os valores anteriormente obtidos pelo LNEG, os valores do SPF anual obtidos pela aplicação são menos coincidentes para as localidades de Amarante (1,8%), Guarda (1,2%) e Bragança (1,2%), sendo que em Aveiro, Coimbra e Covilhã os valores são iguais (**Figura 14**).

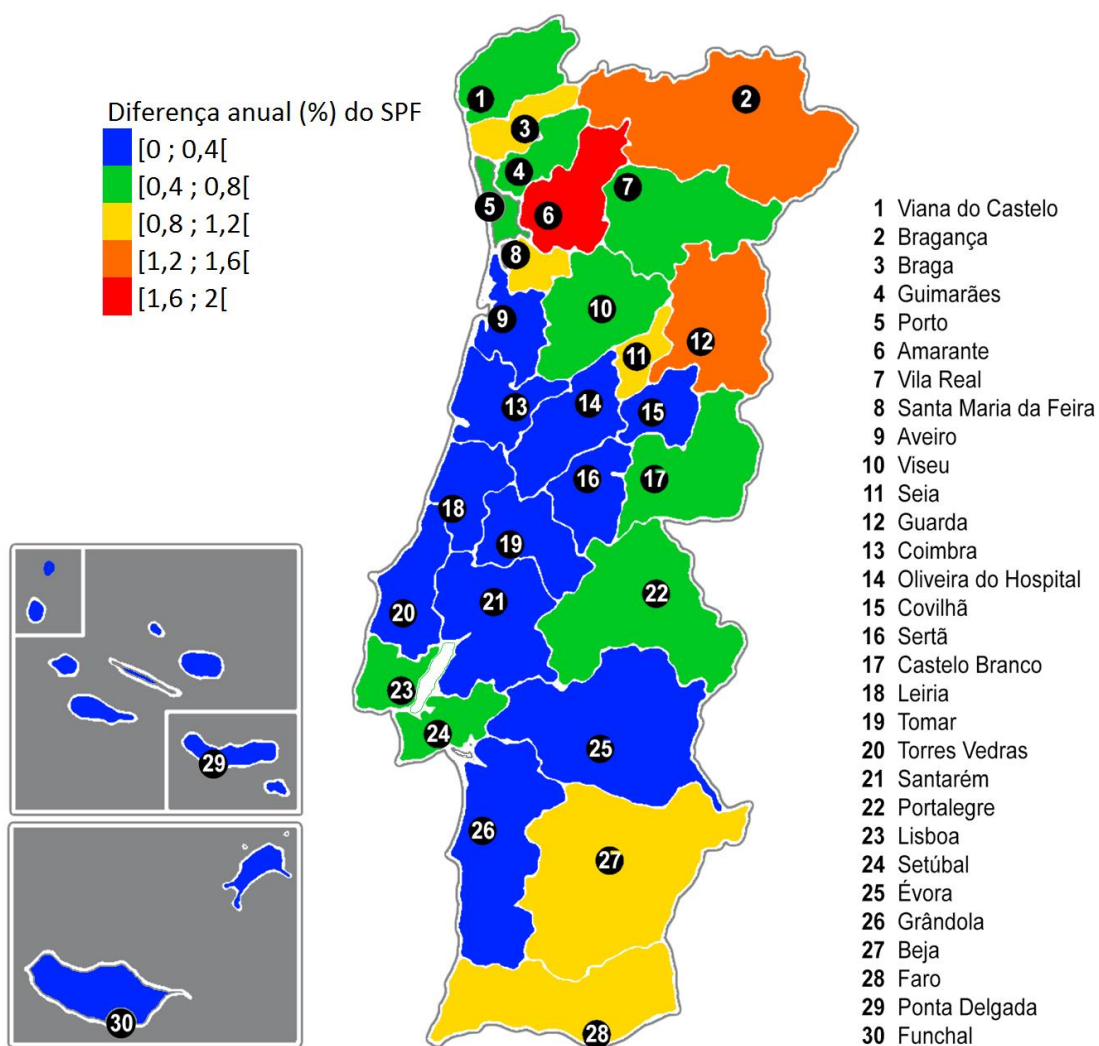


Figura 14 – Diferença entre os valores do SPF anual (Sistema III)

Capítulo 5 – Conclusão

Neste trabalho propôs-se o desenvolvimento de uma ferramenta que simula o funcionamento anual de uma bomba de calor assistida por energia solar, que seja de fácil interação, cujos resultados são facilmente interpretados pelo utilizador, permitindo ao possível cliente averiguar o custo energético das suas necessidades de consumo. Esta facilmente permite também conhecer o SPF, a energia proveniente de fonte renovável e as perdas térmicas anuais do depósito.

O modelo de depósito desenvolvido foi minuciosamente testado antes da conclusão da aplicação, permitindo o estudo do seu comportamento durante os períodos de extração e durante o período de funcionamento da bomba de calor, assim como a ocorrência simultânea de extração e aquecimento da água do depósito. Os resultados obtidos e as comparações efetuadas comprovam a validação deste modelo.

A aplicação encontra-se concebida para 3696 configurações distintas (308 municípios, 4 perfis de extração e 3 sistemas), das quais 90 foram comparadas com resultados anteriormente obtidos pelo LNEG para caracterização dos sistemas I, II e III. Analisando os valores do SPF mensal, verifica-se que para essas configurações existe alguma divergência na amplitude entre os meses com pior e melhor SPF. Tal poderá dever-se às alterações necessárias para a convergência do sistema de equações da bomba de calor. Porém, não é perceptível através dos resultados obtidos, se existe uma subestimação ou sobrestimação da energia solar convertida e das perdas térmicas do depósito. Ainda assim, são mais relevantes para o presente trabalho os valores do SPF anual obtidos pela aplicação, uma vez que a diferença relativamente aos valores anteriormente obtidos no LNEG é sempre inferior a 2%, sendo inclusivamente muitas vezes coincidente. A nível absoluto, Ponta Delgada apresenta, para todos os sistemas, o SPF anual mais elevado. Na situação oposta encontra-se a cidade de Viseu, sendo também perceptível que, de uma forma geral, à medida que se avança para sul em Portugal continental o SPF vai aumentando.

Futuramente, poderá ser acrescentado à aplicação a possibilidade de o utilizador definir o seu próprio perfil de extração diário, bem como os dias da semana em que esse perfil é alterado, e até simular dias sem extração, para períodos de férias, por exemplo. Outro parâmetro passível de ser alterado no futuro tendo em conta o interesse do utilizador, é a amplitude de temperaturas do controlador. Por definição, o ângulo de inclinação do painel termodinâmico é de 45°, mas poderá ser vantajoso modificá-lo, tendo em conta o perfil de extração definido, através do desenvolvimento de uma metodologia para a otimização desse ângulo. Poderá também ser adicionada uma componente de análise económica, tendo em vista o custo da eletricidade e o

ciclo de vida do equipamento. Por fim, outra alteração interessante seria tentar diminuir o tempo de simulação, aplicando outros métodos ou reformando o código do programa, podendo, hipoteticamente, ser aumentado o número de nós do depósito (seis).

Referências Bibliográficas

- [1] Parlamento Europeu, “Política Energética: Princípios Gerais,” 2014.
- [2] Parlamento Europeu, “Energias Renováveis,” 2014.
- [3] Agência Internacional de Energia, “World Energy Outlook 2013,” 2013.
- [4] Federação Europeia da Indústria Solar Térmica (ESTIF), “Solar Thermal Market in Europe - Trends and Market Statistics 2013,” 2014.
- [5] Direção Geral de Energia e Geologia, “Fatura Energética Portuguesa 2013,” 2014.
- [6] Direção Geral de Energia e Geologia, “Balanço Energético 2013,” 2014.
- [7] Direção Geral de Energia e Geologia, “Inquérito ao Consumo de Energia no Sector Doméstico 2010,” 2011.
- [8] F. Cardoso, “Podemos chegar aos 120.000m²,” *Edifícios e Energia*, Setembro/Outubro 2014.
- [9] “Renewable Heating & Cooling Platform,” [Online]. Available: <http://www.rhc-platform.org/>. [Acedido em junho 2015].
- [10] Renewable Heating & Cooling, “Cross-Cutting Technology Roadmap,” Bruxelas, 2014.
- [11] “EUREC,” [Online]. Available: <http://www.eurec.be/en/Projects-Partnerships/European-Technology-Platforms/Renewable-Heating-and-Cooling/>. [Acedido em junho 2015].
- [12] “Solar Heating & Cooling Program,” [Online]. Available: <http://task44.iea-shc.org/description>. [Acedido em junho 2015].
- [13] “PVGIS,” [Online]. Available: <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/download/download.htm>. [Acedido em janeiro 2015].
- [14] Portal Energia, “Energia Solar Térmica - manual sobre tecnologias, projecto e instalação,” 2004.
- [15] C. Honsberg e S. Bowden, “PVEDUCATION,” [Online]. Available: <http://pveducation.org/>. [Acedido em junho 2015].
- [16] Y. Goswami, F. Kreith e J. F. Kreider, *Principles of Solar Engineering*, CRC Press, 2015.
- [17] Y. Cengel e M. Boles, *Termodinamica*, McGraw Hill, 2011.
- [18] “EN 15316-4-2: 2008. Heating systems in buildings. Method for calculation of system energy requirements and system efficiencies,” 2008.

- [19] M. Kaltschmitt, W. Streicher e A. Wiese, *Renewable Energy - Technology, Economics and Environment*, Springer, 2007.
- [20] E. Frank, M. Haller, S. Herkel e J. Ruschenburg, “Systematic Classification of Combined Solar Thermal and Heat Pump Systems,” em *Proceedings of the EuroSun 2010 Conference*, Graz, Austria, 2010.
- [21] S. Chaturvedi, V. Gagrani e T. Abdel-Salam, “Solar-assisted heat pump - A sustainable system for low-temperature water heating applications,” *Elsevier*, 2013.
- [22] X. Kong, D. Zhang, Y. Li e Q. Yang, “Thermal performance analysis of a direct-expansion solar-assisted heat pump water heater,” *Energy*, 2011.
- [23] J. Facão e M. J. Carvalho, “New test methodologies to analyze direct expansion solar assisted heat pumps for domestic hot water,” *Solar energy* 100, pp. 66-75, 2014.
- [24] M. Zhu, H. X. B. Zhang e X. Guan, “The Characteristics of the Evaporator/Evaporator for Direct Expansion Solar Assisted Heat Pump System,” *Journal of Power and Energy Engineering*, pp. 73-76, 2013.
- [25] M. J. Carvalho, “Princípios Gerais para Concepção e Dimensionamento de Sistemas Solares Térmicos Activos,” 1998.
- [26] “Codeproject,” [Online]. Available: <http://www.codeproject.com/Articles/710181/Visual-Basic-6-0-A-giant-more-powerful-than-ever>. [Acedido em janeiro 2015].
- [27] M. Dias. [Online]. Available: http://www.mdias.uac.pt/AN_0506/act_1.pdf. [Acedido em junho 2015].
- [28] C. Balsa, “Capítulo 2 - Sistemas de Equações Lineares,” [Online]. Available: http://www.ipb.pt/~balsa/teaching/MN08/Sist_Lin.pdf. [Acedido em março 2015].
- [29] “Wikipédia - Eliminação de Gauss-Jordan,” [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Gaussian_elimination. [Acedido em junho 2015].
- [30] C. Balsa, “Capítulo 3 - Sistemas de Equações Lineares,” [Online]. Available: http://www.ipb.pt/~balsa/teaching/1011/M1/cap3_aula.pdf. [Acedido em Março 2015].
- [31] C. Balsa, “Capítulo 4 - Equações Não-Lineares,” [Online]. Available: <http://www.ipb.pt/~balsa/teaching/1011/MAE/cap4.pdf>. [Acedido em março 2015].
- [32] C. Conde e E. Schiavi, *Métodos numéricos de resolución de ecuaciones no lineales*.
- [33] Comissão Europeia, “Regulamento (UE) N.º814/2013,” *Jornal Oficial da União Europeia*, vol. 239, pp. 162-183, 2013.
- [34] “EN 16147:2011. Heat pumps with electrically driven compressor – Testing and requirements for marking of domestic hot water units,” 2011.

- [35] Comissão Europeia, “Decisão da Comissão 2013/114/EU,” *Jornal Oficial da União Europeia*, vol. 62, pp. 27-35, 2013.
- [36] “LNEG,” [Online]. Available: <http://www.lneg.pt/servicos/328/2263/>. [Acedido em março 2015].
- [37] J. A. Duffie e W. A. Beckman, em *Solar Engineering of Thermal Processes*, Wiley, 2013, pp. 379-384.
- [38] N. Ghaddar e A. Al-Marafie, “Numerical simulation of stratification behaviour in thermal storage tanks,” *Applied Energy*, vol. 32, n.º 3, pp. 225-239, 1989.
- [39] J. K. Kuhn, G. F. Vonfuchs e A. P. Zob, “Developing and Upgrading of Solar System Thermal Energy Storage Simulation Models,” Maio 1980.
- [40] B. J. Newton, “Modeling of Solar Storage Tanks,” 1995.
- [41] “Waxa software,” [Online]. Available: http://www.vaxasoftwre.com/doc_eduen/qui/caloresph2o.pdf. [Acedido em abril 2015].
- [42] D. Sonntag, Important New Values of the Physical Constants of 1986, Vapour Pressure Formulations based on the IST-90 and Psychrometer Formulae, 1990, pp. 340-344.
- [43] K. Vajen, M. Kramer e E. Frank, “Extended Model Equation for uncovered collectors,” em *ISES Solar World Congress*, Gotemburgo, 2003.
- [44] G. L. Morrison, “Simulation of Packaged Solar Heat-Pump Water Heaters,” *Solar Energy*, vol. 53, pp. 249-257, 1994.

Anexos

Anexo Ia – Ciclo de Consumo S (EN 16147:2011)

	Hora de início	Energia (kWh)	Tipo	ΔT desejada (K), a ser mantida durante a extração	ΔT (K) mínima para contar como energia útil
1	07:00	0,105	Pequeno		15
2	07:30	0,105	Pequeno		15
3	08:30	0,105	Pequeno		15
4	09:30	0,105	Pequeno		15
5	11:30	0,105	Pequeno		15
6	11:45	0,105	Pequeno		15
7	12:45	0,315	Lavagem louça	45	
8	18:00	0,105	Pequeno		15
9	18:15	0,105	Limpeza casa		30
10	20:30	0,420	Lavagem louça	45	
11	21:30	5,250	Grande		30
Total		2,1			

Anexo Ib – Ciclo de Consumo M (EN 16147:2011)

	Hora de início	Energia (kWh)	Tipo	ΔT desejada (K), a ser mantida durante a extração	ΔT (K) mínima para contar como energia útil
1	07:00	0,105	Pequeno		15
2	07:15	1,400	Duche		30
3	07:30	0,105	Pequeno		15
4	08:01	0,105	Pequeno		15
5	08:15	0,105	Pequeno		15
6	08:30	0,105	Pequeno		15
7	08:45	0,105	Pequeno		15
8	09:00	0,105	Pequeno		15
9	09:30	0,105	Pequeno		15
10	10:30	0,105	Limpeza chão	30	
11	11:30	0,105	Pequeno		15
12	11:45	0,105	Pequeno		15
13	12:45	0,315	Lavagem louça	45	
14	14:30	0,105	Pequeno		15
15	15:30	0,105	Pequeno		15
16	16:30	0,105	Pequeno		15
17	18:00	0,105	Pequeno		15
18	18:15	0,105	Limpeza casa		30
19	18:30	0,105	Limpeza casa		30
20	19:00	0,105	Pequeno		15
21	20:30	0,735	Lavagem louça	45	
22	21:15	0,105	Pequeno		15
23	21:30	1,400	Duche		30
Total		5,845			

Anexo Ic – Ciclo de Consumo L (EN 16147:2011)

	Hora de início	Energia (kWh)	Tipo	ΔT desejada (K), a ser mantida durante a extração	ΔT (K) mínima para contar como energia útil
1	07:00	0,105	Pequeno		15
2	07:15	1,400	Duche		30
3	07:30	0,105	Pequeno		15
4	07:45	0,105	Pequeno		15
5	08:05	3,605	Banho	30	
6	08:25	0,105	Pequeno		15
7	08:30	0,105	Pequeno		15
8	08:45	0,105	Pequeno		15
9	09:00	0,105	Pequeno		15
10	09:30	0,105	Pequeno		15
11	10:30	0,105	Limpeza chão	30	
12	11:30	0,105	Pequeno		15
13	11:45	0,105	Pequeno		15
14	12:45	0,315	Lavagem louça	45	
15	14:30	0,105	Pequeno		15
16	15:30	0,105	Pequeno		15
17	16:30	0,105	Pequeno		15
18	18:00	0,105	Pequeno		15
19	18:15	0,105	Limpeza casa		30
20	18:30	0,105	Limpeza casa		30
21	19:00	0,105	Pequeno		15
22	20:30	0,735	Lavagem louça	45	
23	21:00	3,605	Banho	30	
24	21:30	0,105	Pequeno		15
Total		11,655			

Anexo Id – Ciclo de Consumo XL (EN 16147:2011)

	Hora de início	Energia (kWh)	Tipo	ΔT desejada (K), a ser mantida durante a extração	ΔT (K) mínima para contar como energia útil
1	07:00	0,105	Pequeno		15
2	07:15	1,820	Duche		30
3	07:26	0,105	Pequeno		15
4	07:45	4,420	Banho	30	
5	08:05	0,105	Pequeno		15
6	08:15	0,105	Pequeno		15
7	08:30	0,105	Pequeno		15
8	08:45	0,105	Pequeno		15
9	09:00	0,105	Pequeno		15
10	09:30	0,105	Pequeno		15
11	10:00	0,105	Pequeno		15
12	10:30	0,105	Limpeza chão	30	
13	11:00	0,105	Pequeno		15
14	11:30	0,105	Pequeno		16
15	11:45	0,105	Pequeno		15
16	12:45	0,735	Lavagem louça	45	
17	14:30	0,105	Pequeno		15
18	15:00	0,105	Pequeno		15
19	15:30	0,105	Pequeno		15
20	16:00	0,105	Pequeno		15
21	16:30	0,105	Pequeno		15
22	17:00	0,105	Pequeno		15
23	18:00	0,105	Pequeno		15
24	18:15	0,105	Limpeza casa		30
25	18:30	0,105	Limpeza casa		30
26	19:00	0,105	Pequeno		15
27	20:30	0,735	Lavagem louça	45	
28	20:46	4,420	Banho	30	
29	21:15	0,105	Pequeno		15
30	21:30	4,420	Banho	30	
Total		19,07			