



Universidade de Aveiro Departamento de Ambiente e Ordenamento

Ano 2015/2016

**CARLOS EDUARDO FREIRE ANÁLISE COMPARATIVA DO SISTEMA SOLAR  
D'ALMEIDA TERMODINÂMICO VS. SISTEMA SOLAR TÉRMICO**



**CARLOS EDUARDO FREIRE D'ALMEIDA ANÁLISE COMPARATIVA DO SISTEMA SOLAR TERMODINÂMICO VS. SISTEMA SOLAR TÉRMICO**

Relatório de estágio apresentado à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Sistemas Energéticos Sustentáveis, realizada sob a orientação científica do Doutor Vítor António Ferreira da Costa, Professor Associado com Agregação do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

## **O júri**

Presidente

Prof. Doutor Luís António da Cruz Tarelho  
Professor Auxiliar, Universidade de Aveiro

Vogal - Arguente principal

Prof. Doutor Fernando José Neto da Silva  
Professor Auxiliar, Universidade de Aveiro

Vogal - Orientador

Prof. Doutor Vítor António Ferreira da Costa  
Professor Associado C/ Agregação, Universidade de Aveiro

**Palavras-chave**

Sistema solar térmico, sistema solar termodinâmico, radiação, temperatura do ar, fração solar, energia térmica.

**Resumo**

Com este trabalho pretende-se comparar energeticamente e financeiramente o sistema solar térmico e o sistema solar termodinâmico aplicados para captura de energia solar em sistema de água quente sanitária. Para isso comparou-se, a partir do software Retscreen e EcoREN, o desempenho e performance de cada sistema, que depende em muito da temperatura do ar e da radiação incidente local, para três cidades portuguesas: Bragança, Coimbra e Faro. Daí foi possível perceber o fluxo de caixa anual de cada sistema solar em relação a um sistema de referência (termoacumulador elétrico), e obtiveram-se os dados financeiros que demonstram a viabilidade de cada projeto e auxiliam na escolha do sistema solar mais adequado a implementar em cada uma das cidades referenciadas. Os resultados obtidos indicam que o sistema solar térmico está mais dependente da radiação, e, portanto, tem maior oscilação da fração solar ao longo do ano, e do local (Bragança 55 %, Coimbra 61 % e Faro 68 %). Já no sistema solar termodinâmico, a fração solar obtida é relativamente constante, mantendo-se a cerca de 65%, independentemente da localização, sendo compensado por um maior trabalho e consumo elétrico por parte do compressor em períodos de menor eficiência térmica. Em termos financeiros o sistema solar térmico apresentou payback inferior para Coimbra e Faro, tal como um maior fluxo de caixa, pois o sistema solar termodinâmico tem custos extra associados ao compressor.

**Keywords**

Solar thermal system, thermodynamic solar system, radiation, air temperature, solar fraction, thermal energy.

**Abstract**

The aim of this work is to make an energy and financial comparison between a solar thermal system and a thermodynamic solar system, when applied as a domestic hot water heater. With the support of Retscreen and EcoREN *software*, was modeled the performance of each system, which are mainly affected by air temperature and incident solar radiation. The study was conducted for three portuguese cities: Bragança, Coimbra and Faro. Therefore, it was possible to compare the cashflow of different systems relative to a reference technology (electric thermal accumulator). The financial data in particular was key in determining the viability of each solar system and may work as a support in the decision making for the most suitable solar system which should be implemented in each of the studied cities. The obtained results show that the solar thermal system is more dependent of the radiation, therefore there is a major swing of the solar fraction throughout the year, and the location (Bragança 55 %, Coimbra, 61 % and Faro 68 %). As for the thermodynamic solar system, the solar fraction is relatively constant, around 65 %, no matter the location, although more work is required from the compressor. As for the financial aspect, with the solar thermal system the payback is lower for Coimbra and Faro, and also have higher cashflow, because the thermodynamic solar system has extra costs with the compressor.

# ÍNDICE

Índice.....	vi
LISTA DE FIGURAS.....	vii
LISTA DE TABELAS.....	vii
LISTA DE SÍMBOLOS.....	viii
LISTA DE GRANDEZAS.....	viii
LISTA DE ABREVIATURAS.....	viii
Capítulo I: Introdução .....	1
1.1 Objetivos.....	1
1.2 Motivação .....	2
Capítulo II: Políticas e Incentivos Nacionais .....	3
Capítulo III: Estado da Arte .....	7
3.1 Sistemas Solares de Aquecimento de Águas Sanitárias (AQS) .....	7
3.2 Sistema Solar Térmico .....	11
3.2.1 Coletores Solares .....	14
3.2.2 Rastreamento Solar .....	21
3.2.3 Transferência de Calor: Coletor – Reservatório.....	21
3.2.4 Sistema de Operação .....	23
3.3 Sistema Solar Termodinâmico .....	25
Capítulo IV: Simulação de sistemas Solares .....	31
4.1 <i>Software</i> RETScreen® .....	31
4.2 Simulação do Sistema Solar Térmico.....	36
4.2.1 Cenário 1 – Sistema Solar Térmico Padrão .....	37
4.2.2 Cenário 2 – Sistema Solar Térmico <i>SOLAHART INDUSTRIES</i> .....	41
4.3 <i>Software</i> EcoREN - Termodinâmico.....	47
4.3.1 Cenário 3 – Sistema Solar Termodinâmico – ENERGIE Eco 200.....	50
4.4 Comparação de Resultados das simulações.....	57
Capítulo V: Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros .....	63
Referências.....	65
Anexo .....	69
Anexo A – Perfil L extraído do Quadro 1 do Anexo III do Regulamento (EU) n.º 814/2013 .....	69

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Energia Solar disponível vs. Consumo Energético para AQS: (1) período de aquecimento, (2) meia estação, (3) período de arrefecimento [12].....	9
Figura 2 - Tipos de coletor e fator de concentração [26].....	14
Figura 3 - Coletor Solar Plano [27] .....	16
Figura 4 - Espectro da radiação solar [28].....	17
Figura 5 - Coletor Parabólico Concentrador [27] .....	19
Figura 6 - Coletor de tubos de vácuo. Fonte: <a href="http://www.marla.pt/paineis-vacuio.php">http://www.marla.pt/paineis-vacuio.php</a> .....	20
Figura 7 - Sistema solar (1) Direto (2) Indireto [19] .....	22
Figura 8 - Sistema Solar Térmico com circulação em termossifão [29] .....	23
Figura 9 - Sistema Solar de (1) Circulação Natural (2) Circulação Forçada [19].....	25
Figura 10 - Sistema Solar Termodinâmico, disponível em <a href="https://rjafonso.files.wordpress.com/2011/05/esquema_eco300.gif">https://rjafonso.files.wordpress.com/2011/05/esquema_eco300.gif</a> .....	26
Figura 12 - Coletor Solar Termodinâmico [19].....	27
Figura 13 - Princípio de funcionamento do Sistema Solar Termodinâmico [19] .....	28
Figura 13 - Modelo matemático Retscreen [30] .....	32
Figura 14 - Fluxo de caixa cumulativo (€), cenário 1 para Coimbra .....	41
Figura 15 - Fluxo de caixa cumulativo (€), cenário 2 para Coimbra .....	47
Figura 16 - <i>Software</i> EcoREN.....	49
Figura 17 - Fluxo de caixa cumulativo (€), cenário 3 para Coimbra .....	54
Figura 18 - Fração Solar, Bragança .....	58
Figura 19 - Fração Solar, Coimbra .....	58
Figura 20 - Fração Solar, Faro.....	59
Figura 21 - Resumo das simulações sazonais.....	60

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tipos de classificação de sistemas solares de AQS.....	13
Tabela 2 - Dados meteorológicos. Fonte: Retscreen/NASA.....	33
Tabela 3 - Consumo AQS. Fonte: Retscreen.....	35
Tabela 4 – Características coletor solar padrão .....	38
Tabela 5 - Calor fornecido e fração solar, Cenário 1 .....	39
Tabela 6 - Análise Financeira, Cenário 1 .....	40
Tabela 7 - Características coletor Solahart J .....	42
Tabela 8 - Calor fornecido e fração solar, Cenário 2 .....	43
Tabela 9 – Resultados do calor fornecido por cada período do ano, Solahart.....	45
Tabela 10 - Análise Financeira, Cenário 2 .....	46
Tabela 11 – Resultados de simulação EcoREN .....	50
Tabela 12 - Resultados do calor fornecido por cada período do ano, ENERGIE .....	52
Tabela 13 - Análise Financeira, Cenário 3 .....	53
Tabela 14 - Resumo energético.....	54

Tabela 15 - Resumo financeiro.....	55
Tabela 16 – Resumo da Análise Financeira .....	61

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\alpha$	Radiação absorvida por uma superfície (kWh/m <sup>2</sup> )
$\beta$	Inclinação (°C)
$\gamma$	Azimute (°C)
$\Delta T$	Diferença de temperaturas (°C)
$\eta$	Rendimento (%)
$\eta_c$	Eficiência coletor (%)
$\rho$	Radiação refletida por uma superfície (kWh/m <sup>2</sup> )
$\tau$	Radiação transmitida por uma superfície (kWh/m <sup>2</sup> )

## LISTA DE GRANDEZAS

$a_1$	Coeficiente de perdas térmicas (W/m <sup>2</sup> ) / °C
$a_2$	Coeficiente de perdas térmicas (W/m <sup>2</sup> ) / °C <sup>2</sup>
COP	Coeficiente de performance, (adimensional)
$C_p$	Calor específico da água (J/(kg.K))
$E$	Energia diária total (kWh/dia)
$E_{REN}$	Energia produzida pela fonte de energia renovável (kWh)
$f$	Caudal útil da água (L/min)
$G_{solar}$	Radiação Solar incidente (W/m <sup>2</sup> )
$h$	Frequência de consumo (L/min)
$\dot{m}$	Caudal de água (kg/s)
$Q_c$	Energia consumida pelo compressor (kWh)
$Q_{tap}$	Energia útil (kWh)
$Q_{usable}$	Energia anual fornecida pela bomba de calor (kWh)
SPF	Fator de desempenho anual (adimensional)
SPF <sub>j</sub>	Fator de desempenho diário experimental (adimensional)
$T_{ar}$	Temperatura do ar ambiente (°C)
$T_m$	Temperatura útil da água
$T_p$	Temperatura de pico
TIR	Taxa Interna de Retorno (%)
VAL	Valor Atualizado Líquido (€)

## LISTA DE ABREVIATURAS

AQS	Água Quente Sanitária
CPC	Coletor Parabólico Concentrador
EU	União Europeia



# CAPÍTULO I: INTRODUÇÃO

## 1.1 OBJETIVOS

Pretende-se, neste relatório, dar a entender os princípios de funcionamento dos métodos de recolha da energia solar para aproveitamento no aquecimento de água sanitárias (AQS), e fazer uma comparação dos sistemas solares térmicos e termodinâmicos, tanto a nível financeiro como a nível de performance e desempenho, optando por criar cenários comparativos de forma a entender a influência que certos parâmetros podem ter num projeto desta natureza. Tendo recorrido ao *software* de simulação Retscreen, para o sistema solar térmico, e ao *software* EcoREN, para o sistema solar termodinâmico.

Foram considerados os seguintes fatores financeiros relativos aos sistemas solares para AQS: o investimento inicial, os custos de manutenção, os gastos operacionais, e os fatores de desempenho e eficiência energética como a fração solar e a poupança energética gerada. Foram ainda considerados fatores ambientais relativos a Portugal que beneficiam ou não a obtenção de energia térmica através dos sistemas solares, como a radiação, vento e temperatura, pois a capacidade de captação de energia solar está dependente da altura do dia, estação do ano, céu limpo ou nublado, proximidade ao equador e da eficiência do coletor usado. Para isso, foram tidos em consideração cenários para condições de verão (período de arrefecimento), inverno (período de aquecimento) e período de meia-estação em três localizações distintas (Bragança, Coimbra e Faro). Pretende-se, com esta abordagem, a simulação da instalação dos sistemas solares em condições médias e condições extremas a nível nacional, de fatores ambientais, e também, de fatores geográficos.

Como forma de obtenção dos objetivos, o trabalho foi organizado de forma a, inicialmente, dar conhecimento da situação regulamentar a nível nacional sobre o tema; de seguida foi revisto o estado da arte de cada um dos sistemas solares, e foram descritos os componentes e modo de funcionamento de cada sistema; posteriormente foram considerados alguns cenários e apresentados os resultados obtidos nas simulações deles, para cada uma das simulações consideradas, continuando com a comparação da performance e desempenho energético e benefícios financeiros de cada cenário para os diferentes períodos temporais e as diferentes cidades consideradas. Por fim, procedeu-se às conclusões obtidas propondo futuras intervenções a fazer neste tema.

## 1.2 MOTIVAÇÃO

Vivemos numa época em que se pretende reduzir a dependência energética de fontes de energia fóssil e, como tal, é necessário apresentar soluções que o permitam fazer de forma sustentável. O sistema solar térmico e sistema solar termodinâmico afiguram-se como boas alternativas para aquecimento de água sanitária em relação aos sistemas convencionais, tais como esquentadores e caldeiras, pois permitem a obtenção de energia térmica ao mesmo tempo que reduzem as despesas operacionais associadas, visto que se reduzem as necessidades de consumo de combustível fóssil. Como fontes de aproveitamento de energia solar são, comparativamente, mais simples, mais baratos e mais eficazes do que sistemas solares fotovoltaicos.

A energia solar é considerada uma fonte de energia renovável, e a sua captura não tem custos diretos e está livre de emissões de gases de efeito de estufa. Tem a vantagem de poder ser capturada em toda a superfície terrestre, não tendo, em teoria, limitações ao nível do transporte da energia produzida, sendo o seu acesso facilitado em zonas com escassez energética ou longe da rede de distribuição energética. O Sol como fonte de energia tem um imenso potencial, pois tem uma irradiação ( $G_s$ ), também chamada de constante solar, de  $1353 \text{ W/m}^2$ , tendo a capacidade para gerar, num dia, a energia necessária ao Mundo durante um ano, sendo ainda considerado um recurso inesgotável e constante à escala humana. Mas, sendo um recurso natural, está dependente de fatores não controlados pelo homem: condições meteorológicas, tal como nuvens que refletem parte da radiação recebida, e o facto desta fonte de energia não estar disponível durante a noite, reduzem a possibilidade de edifícios domésticos, ou outros, dependerem apenas da energia solar para garantir toda a energia necessária [1].

Portugal, com as condições ambientais que o caracterizam, é um dos países da Europa com melhores condições de aproveitamento da energia solar, pois tem um número médio anual de horas solares entre os 2200 e 3000, bastante superior a países da Europa central, como a Alemanha, que tem apostado muito nesta fonte de energia, apesar de ter apenas entre 1200 a 1700 horas solares anuais, cerca de metade das que tem Portugal [2] [3].

Tendo em conta o grande potencial da energia solar para aquecimento de águas domésticas, pretende-se, com este trabalho, complementar a informação existente, com resultados comparativos dos dois sistemas solares mais utilizados em Portugal para o aquecimento de águas sanitárias (AQS). Com ele pretende-se analisar as características e as especificidades de cada um dos sistemas solar térmico e do sistema solar termodinâmico, e a obtenção de dados que sirvam de base para a seleção e implementação de projetos semelhantes a nível nacional.

## CAPÍTULO II: POLÍTICAS E INCENTIVOS NACIONAIS

O desenvolvimento e aquisição de tecnologias renováveis, como a energia solar, merecem incentivos, tendo vários benefícios associados à sua utilização. Economizam energia proveniente de combustíveis fósseis, prevenindo a escassez destes recursos, pois são combustíveis não renováveis e reduzem as emissões de dióxido de carbono e outros gases de efeito de estufa. Fontes renováveis como a energia solar produzem energia de uma forma mais sustentável [1]. Permitem reduzir a dependência energética e suas despesas pois a produção própria de energia reduz a dependência de outras fontes de energia externa e da possível variação de preços e escassez dessa fonte energética. A produção interna de energia dá, ainda, dinamismo à economia e cria novos postos de trabalho. A utilização de fontes de energia renováveis está, também, de acordo com o Protocolo de Quioto, a Diretiva 2015/1513 que altera a Diretiva 2009/28/CE para a promoção da utilização de energia proveniente de fontes renováveis [1] e o Pacote Clima-Energia 2020 que pretende a redução dos gases de efeito de estufa em 20% e aumentar em 20% o recurso a energias renováveis no total do consumo energético.

São consideradas como fontes de energia renovável todos os sistemas solares térmicos e os sistemas solares termodinâmicos com fator de desempenho anual (*Season Performance Factor - SPF*) superior a 2,5, de acordo com o Anexo VII do Decreto-Lei n.º 141/2010, de 31 de dezembro, alterado pelo Decreto-Lei n.º 39/2013, de 18 de março, e Decreto-Lei n.º 68-A/2015, de 30 de abril, transposto da Diretiva 2009/28/CE, de 23 de abril.

O Decreto-Lei n.º 118/2013, que transpõe a Diretiva n.º 2010/31/EU, “...*visa promover a melhoria do desempenho energético dos edifícios através do Sistema de Certificação Energética dos Edifícios (SCE) que integra o Regulamento de Desempenho Energético de Edifícios de Habitação e Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços (RECS).*” [4] O SCE aplica-se, para os casos de habitações domésticas, a edifícios novos, a edifícios sujeitos a grande intervenção e em casos de venda, dação em cumprimento ou locação do edifício ou fração. Estes últimos, os edifícios já existentes, não estão sujeitos a requisitos de comportamento térmico ou de eficiência dos sistemas, exceto quando sujeitos a grande intervenção. Segundo o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação (REH), integrado no Decreto-Lei n.º 118/2013, “...*a instalação de sistemas solares térmicos para aquecimento de água sanitária nos edifícios novos e edifício sujeito a grande intervenção é obrigatória sempre que haja exposição solar adequada...*” [4]. Alternativamente, pode-se proceder à instalação de “...*outros sistemas de aproveitamento de*

*energias renováveis que visem assegurar, numa base anual, a obtenção de energia equivalente ao sistema solar térmico.” [4]*

A Diretiva 2009/28/CE foi transposta para Portugal pelo Plano Nacional de Ação para as Energias Renováveis (PNAER) e do Plano Nacional de Ação para a Eficiência Energética (PNAEE), que fixa os objetivos nacionais para a quota de energia proveniente de fontes renováveis para o setor dos transportes, eletricidade e do aquecimento e arrefecimento em 2020. Estes Plano têm objetivos delimitados para 2020, e pretendem:

- 31% do consumo final bruto de energia resulte de fontes renováveis;
- redução da dependência energética do exterior para 74% dos valores de 2005 que servem como referência para o plano nacional;
- redução em 25% o saldo importador energético optando por fontes energéticas endógenas;
- desenvolvimento de tecnologias e criação de 100 mil novos postos de trabalho na área da energia renovável;
- promover o desenvolvimento sustentável [5].

Entre as várias medidas estabelecidas para atingir os objetivos acima mencionados estão incluídas medidas de promoção ao desenvolvimento de tecnologias baseadas no aproveitamento da energia solar, como em sistemas para aquecimento de águas sanitárias.

Os planos PNAEE e PNAER que têm ainda como objetivos, entre outros, a diversificação das fontes de energia primária, o aumento da eficiência energética e a redução das emissões de gases com efeito de estufa. Uma das soluções para atingir estes objetivos passa pela instalação de sistemas solares térmicos e/ou termodinâmicos. Nos planos acima mencionados, são descritas medidas de promoção e possíveis fontes de financiamento para facilitar o cumprimento dos objetivos. Um dos programas previstos no PNAEE na área residencial e de serviços é a integração de fontes de energias renováveis térmicas/solar térmico. O qual visa, tal como o nome indica, a promoção da integração de fontes de energia renovável nos edifícios e equipamentos residenciais e de serviços. Este programa é constituído por duas medidas, uma visa o setor doméstico e outra o setor dos serviços. Na área doméstica a medida pretende a criação de um mercado sustentado para o setor residencial de 100.000 m<sup>2</sup> de coletores solares instalados por ano, 800.000 m<sup>2</sup> até 2016 e 1.2 milhões de m<sup>2</sup> até 2020 [6]. Pretende, igualmente, revitalizar o parque de equipamentos existentes, facilitando a substituição e reparação/manutenção especializada. A implementação desta medida potencializa a classificação energética dada pela Certificação Energética de Edifícios,

existindo ainda apoios direcionados à área da eficiência energética, incluindo a negociação de linhas de crédito direcionadas ao setor doméstico [6].

No PNAEE 2016, de forma a cumprir as metas estabelecidas para o período 2013-2020, são impostas medidas regulatórias, como a quota mínima de classe energética de edifícios novos ou sujeitos a grande remodelação, mecanismos de diferenciação fiscal, discriminação positiva em IRS e apoios financeiros, disponíveis tanto a pessoas singulares como a empresas. Como medidas de financiamento nesta área existem atualmente as seguintes:

- Fundo de eficiência Energética (FEE), apoiado pela ADENE, destinado a apoiar medidas do PNAEE com a finalidade de reduzir a energia final, contribuindo para o cumprimento das metas de eficiência energética para 2020 [7].
- Fundo de Apoio à Inovação (FAI), apoiado pela ADENE, que apoia projetos de inovação e desenvolvimento tecnológico, projetos de demonstração tecnológica nas áreas das energias renováveis e da eficiência energética e projetos de investimento em eficiência energética. Tais projetos têm como condição necessária para concorrer um consumo energético equivalente entre os 2 GWh e os 12 GWh/ano.
- Plano de Promoção da Eficiência no Consumo de Energia Elétrica (PPEC), promovido pela Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos (ERSE) no quadro do PNAC – Plano Nacional para as Alterações Climáticas.
- Fundo Português de Carbono (FPC), que apoia projetos que conduzam à redução de emissões de gases com efeito de estufa.
- Quadro de Referência Estratégico Nacional (QREN)
- JESSICA – Joint European Support for Sustainable Investment in City Areas - instrumento financeiro comunitário que apoia a reabilitação e desenvolvimento urbano sustentável e a eficiência energética e energia renovável em áreas urbanas.

No PNAER 2020 – Plano Nacional de Ação para as Energias Renováveis, são de destacar para o setor residencial na área do aproveitamento de energia solar, as seguintes medidas:

- Solar térmico: pretende promover a instalação de sistemas solares térmicos e a renovação de sistemas solares térmicos em fim de vida útil, estimando-se a poupança de 76.200 tep no período de 2003 até 2020.

- Registo de instaladores de pequenos sistemas renováveis: pretende criar um sistema nacional de registo de instaladores e pequenos sistemas renováveis para fins térmicos, tal como o solar térmico.
- Quadro Comunitário de Apoio 2014-2020: apoio ao financiamento de energias renováveis.
- No setor do aquecimento e arrefecimento, o PNAER projeta um aumento significativo do contributo do solar térmico seguido pela biomassa. Os edifícios sujeitos ao SCE que utilizem energias renováveis para climatização ou aquecimento de AQS são beneficiados em termos de classificação energética, sendo a sua utilização obrigatória sempre que haja condições técnicas para a sua instalação [6].

Encontra-se atualmente em execução a edição 2017-2018 do plano de promoção da eficiência no consumo de energia elétrica (PPEC) lançado pela ERSE em 2006. Este plano pretende fornecer incentivos à indústria e agricultura, comércio e serviços e residencial através de candidatura prévia, tendo como objetivo implementar, ao longo dos 2 anos estipulados, medidas como a instalação de equipamentos com eficiência energética superior ao standard de mercado, campanhas de divulgação e informação sobre os benefícios da eficiência de consumo e auditorias energéticas. Nestas medidas está incluída, no segmento comercial, a adoção de sistemas de aquecimentos mais eficientes, tais como os sistemas solares ou bombas de calor.

O Plano Nacional para as Alterações Climáticas (PNAC) elaborado pela Agência Portuguesa do Ambiente (APA) pretende, entre outras coisas, promover uma economia de baixo carbono e reduzir as emissões nacionais de gases de efeito de estufa (GEE), estabelecendo linhas de orientação para políticas e medidas e metas setoriais. Identifica, para o setor residencial, o potencial de redução de emissões em cerca de 15% até 2030, em relação aos valores de 2005. Tem como medida a promoção da produção do autoconsumo de energia renovável para suprir necessidades de aquecimento de água e prevê o aumento do solar térmico para aquecimento de águas no setor residencial entre 2010 e 2030, pois segundo o PNAC *“...a adoção do solar térmico sobretudo para aquecimento de águas, contribui para um aumento significativo da componente renovável...”* no setor residencial.

## CAPÍTULO III: ESTADO DA ARTE

### 3.1 SISTEMAS SOLARES DE AQUECIMENTO DE ÁGUAS SANITÁRIAS (AQS)

Os sistemas solares de AQS baseiam-se no aproveitamento de energia disponibilizada pelo Sol através da radiação que incide sobre os coletores do sistema. Estes sistemas permitem o aquecimento de água para utilização sanitária, tal como para aquecimento central de habitações, aquecimento de piscinas e aplicações industriais.

Sobre os sistemas solares térmicos já existem bastantes trabalhos, sendo comercializados há já algum tempo, em relação aos sistemas solares termodinâmicos apenas recentemente se começou a ganhar interesse, como tal os trabalhos publicados existem em menor número. Tal acontece igualmente com *software* de modelação e simulação de sistemas, havendo poucos programas, principalmente *software open source*, que permita simular sistemas solares termodinâmicos, e mesmo os que existem têm ainda algumas limitações. Falcão J. & Carvalho, M. publicaram recentemente um artigo científico no qual admitiam um novo método de cálculo para sistemas solares termodinâmicos, tendo, posteriormente, sido estabelecido pelo Despacho n.º 14985/2015 como metodologia oficial de cálculo deste sistema a nível nacional. No sistema solar térmico são de destacar “*Conversão Térmica da Energia Solar*”, documento publicado pela Sociedade Portuguesa de Energia Solar, na qual fazem uma análise exaustiva sobre todo o processo de funcionamento, componentes, viabilidade de investimento e manutenção associados ao sistema. E, também, o guia de “*Energia Solar Térmica*” publicado pelo Portal Energia, que serve de manual de apoio a projetistas e instaladores de sistemas solares térmicos.

Os sistemas solares apresentam-se como sendo das melhores alternativas de produção de AQS, pois permitem a redução dos custos associados ao aquecimento de água, são baseados no aproveitamento de uma fonte renovável, não têm emissão de gases de efeito de estufa e, no caso do sistema solar termodinâmico, tem coeficientes de performance (COP) elevado. Normalmente, visto que estão limitados pela presença do Sol, estes sistemas necessitam de um sistema de apoio convencional, e o seu dimensionamento tem em conta as necessidades energéticas médias anuais [8] ao contrário dos sistemas convencionais tais como esquentadores a gás (butano, propano ou gás natural), termoacumuladores elétricos ou caldeiras (biomassa ou gasóleo de aquecimento), que são dimensionados para cobrir os picos de consumo energético anual. O sistema é instalado e operado de forma a dar prioridade de funcionamento ao sistema solar, recorrendo ao

sistema de apoio apenas quando não há rendimento do sistema solar, de forma a ter a maior quantidade possível de energia obtida a partir do Sol, reduzindo assim os gastos operacionais.

Os sistemas de aquecimento convencionais deverão estar instalados à saída do reservatório do sistema solar no caso do sistema convencional produzir água quente instantaneamente, como os esquentadores, ou em alternativa deverá estar servido com um outro reservatório que receba água do reservatório solar, pré aquecida pelo sistema solar, em casos como os de caldeiras ou termoacumuladores que não têm uma produção instantânea de água quente [8].

A instalação de sistemas solares para aquecimento de águas sanitárias é especialmente recomendada quando é necessário aquecer grandes quantidades de água, havendo uma significativa redução de custos em relação a outros sistemas de AQS. Recomenda-se, igualmente, a substituição do sistema de AQS em casos em que o custo da energia é bastante alto, como em caldeiras de aquecimento a gásóleo ou propano, ambos combustíveis bastante caros, quando o fornecimento de fontes de energia convencionais não está assegurado, como em zonas remotas ou em países em vias de desenvolvimento [9] e quando há interesse na defesa do ambiente e redução de emissões de gases de efeito de estufa.

Apesar de tudo, o sistema, é algo limitado no que diz respeito ao consumo de AQS, isto é, juntando ao facto da energia solar não estar disponível durante o período noturno, o sistema solar não fornece água quente de forma instantânea e o sistema de apoio, normalmente, também não, visto que o mais usual é a integração com um termoacumulador elétrico. Isto, por vezes, força o utilizador a alterar os seus hábitos e horários de consumo, pois um mau aproveitamento do recurso solar por parte do utilizador pode inviabilizar a sua aquisição [10]. O facto de o sistema solar ser apenas recentemente comercializada, em relação a outros sistemas de AQS convencionais, pode ser um fator problemático pois podem ocorrer problemas facilmente resolvidos, como a acumulação de sujidade no coletor, que reduzem a eficiência do sistema, mas que por falta de conhecimento ou falta de atenção em relação ao calor fornecido pelo sistema por parte do utilizador levam a que o sistema não funcione tal como foi dimensionado e que os ganhos económicos sejam mais reduzidos.

Exemplo de boa utilização: se a água armazenada no reservatório for utilizada durante a manhã então será possível ao sistema solar fornecer a energia necessária para aquecer novamente água, que será armazenada durante a noite, possibilitando novo consumo de AQS na manhã do dia seguinte.



Exemplo de má utilização: em casos em que o reservatório de armazenamento de AQS é reabastecido ao final do dia, o sistema solar não tem a capacidade de voltar a aquecer a água para o início do próximo dia, obrigando o sistema de reserva a aquecer a água durante a noite. Neste caso, se não houver utilização da AQS na manhã do dia seguinte, então o calor gerado pelo sistema de reserva foi em vão e não se verificam poupanças energéticas, pois o sistema solar não esteve em uso. Para maximizar o fornecimento energético dos sistemas de apoio dos sistemas solares é recomendado ligar ou desligar o sistema de reserva, consoante as previsões meteorológicas e as previsões de necessidades de AQS.

O sistema solar térmico e o sistema solar termodinâmico são bastante intermitentes, sendo de todos os sistemas energéticos renováveis dos que menores números de horas de funcionamento por ano conseguem obter, comparando, por exemplo, com turbinas eólicas ou centrais hidroelétricas. Durante o verão, em Portugal, é relativamente mais fácil produzir a AQS necessária pois não só existem maiores níveis de radiação, definido na figura 1 como “irradiation” como também existem menores necessidades energéticas associadas ao consumo de AQS (*definido como “total consumption”,* Figura 1).

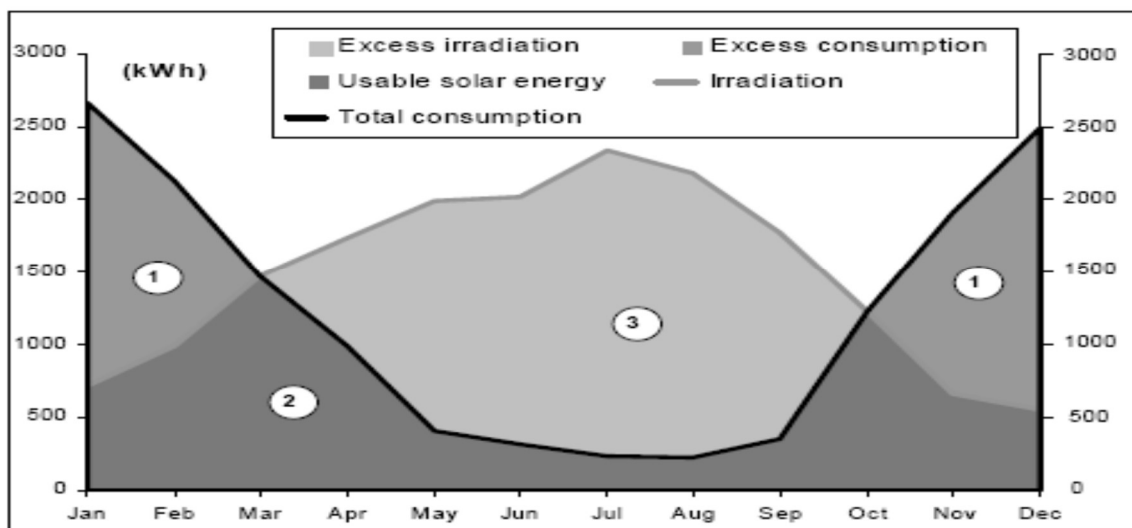


FIGURA 1 - ENERGIA SOLAR DISPONÍVEL VS. CONSUMO ENERGÉTICO PARA AQS: (1) PERÍODO DE AQUECIMENTO, (2) MEIA ESTAÇÃO, (3) PERÍODO DE ARREFECIMENTO [12]

Pode-se ver, pela Figura 1, que um dos grandes problemas de dimensionamento dos sistemas solares é tentar conciliar um período de arrefecimento (ponto 3) com excesso de radiação e menor consumo, com um período de aquecimento (ponto 1) com menores níveis de radiação e excesso

de consumo, consumo este que se deve, em grande parte, às necessidades de água quente para climatização da habitação, algo que não foi considerado para o cálculo dos cenários deste trabalho, pois foi considerado o consumo anual constante apenas para AQS, estipulado pelo Quadro 1 do Anexo III do Regulamento (EU) n.º 814/2013 presente no Anexo A. Em períodos de menor exposição solar, o sistema poderá ser incapaz de fornecer a energia necessária para o aquecimento da água para consumo, requerendo o funcionamento de um sistema de apoio convencional que forneça essa energia, apesar de durante esse período não haver poupança em combustível.

Em relação a sistemas convencionais de AQS, os sistemas solares têm um período de aquecimento curto, funcionando só quando a fonte de energia, o Sol, está disponível, sendo obtidas, pelo sistema, menores eficiências durante as estações frias e em locais com pouca exposição solar [11]. Caso não haja sistema de apoio, não há forma de compensar as perdas térmicas existentes no reservatório de armazenamento ao longo dos períodos noturnos em que o sol não está disponível [12].

Financeiramente, o sistema solar térmico é considerado pouco competitivo comparado com as várias alternativas disponíveis no mercado, muito devido ao facto de requerer um grande investimento inicial e ter *payback* menos apelativo, isto porque apesar dos custos operacionais serem bastante mais reduzidos é necessário mais tempo para recuperar o investimento inicial, algo que será discutido mais à frente neste trabalho. Mas, tendo em conta o tempo de vida útil do sistema solar térmico, que é por norma superior às restantes alternativas convencionais, torna a aquisição do sistema mais viável neste aspeto [12]. Por exemplo, comparando com um esquentador a gás natural, com investimento inicial bastante mais reduzido que o sistema solar térmico, obtém-se *payback* de 2/3 anos, ao passo que o sistema solar térmico necessita de mais tempo, normalmente mais de 5 anos, dependendo do consumo de AQS que necessita cobrir. Mas, se compararmos a poupança adquirida ao longo do tempo de vida dos sistemas, verifica-se que a melhor alternativa é o sistema solar térmico, pois é possível uma maior poupança mensal e tem também um maior tempo de vida útil, entre 20 a 25 anos.

Um maior *payback* do sistema solar térmico pode ser considerado como um fator impeditivo para a sua aquisição, pois em casos de agregados familiares em situações económicas difíceis acabam por optar por um sistema alternativo em que esteja prevista a recuperação do investimento num período de tempo mais curto [12]. Um outro fator negativo são as taxas de juro, cobrada em empréstimos, aplicadas pelos fornecedores de outras fontes de energia. Os fornecedores equipamentos de fontes convencionais como equipamentos elétricos, por exemplo,

têm maior capital, sendo-lhes mais fácil recorrer a taxas de desconto mais favoráveis aquando da venda de equipamentos [12]. Também a falta de consciencialização para fatores externos ligados ao uso de combustíveis fósseis, como a poluição do ar e as alterações climáticas, retira mercado aos sistemas solares.

Em Portugal, considera-se que as fontes de energia renováveis têm grande potencial e isso reflete-se na crescente aposta neste tipo de energias nos vários setores de atividade, incluindo no setor doméstico. Portugal é um país com poucos recursos ou reservas fósseis e, assim sendo, de forma a assegurar o fornecimento de energia deve-se optar pela diversificação do *mix* energético (optar por dividir as necessidades energéticas por diferentes fontes energéticas), e sustentabilidade da produção, transporte e consumo de energia [5]. Mas existem ainda algumas limitações em relação à aquisição deste tipo de sistemas, para além das limitações gerais dos sistemas solares referidas anteriormente. Em Portugal, há vários fatores que retiram a vontade de investir num sistema destes por parte do utilizador, tais como: processos burocráticos, e a necessidade de pedir autorização às Câmaras Municipais para a instalação de sistemas solares, processo esse que pode ser moroso. Para o caso de se querer instalar um painel solar num apartamento, haverá sempre a necessidade de pedir autorização do condomínio, pois a cobertura é uma parte comum do edifício, logo, de todos os seus condóminos. Há, também, certas dificuldades na instalação do sistema em apartamentos devido às grandes dimensões do reservatório de armazenamento. Há, também, falta de motivação para a aquisição de um sistema de AQS um pouco mais complexo, que precisa de alguma manutenção, e que por vezes requer a alteração dos hábitos de consumo. Existe ainda uma grande lacuna em termos de incentivos ao investimento em sistemas de eficiência energética a proprietários de edifícios ou de frações de edifícios arrendados a terceiros [12], num país em que, à data do último censo (2011), havia cerca de 800 mil alojamentos arrendados [13].

### 3.2 SISTEMA SOLAR TÉRMICO

Existem vários modelos de sistemas solares térmicos, mas todos consistem essencialmente num coletor de energia solar, um reservatório de armazenamento de água quente e um controlador de forma a definir programas e temperaturas de funcionamento. Podendo, no caso do sistema com circulação forçada, ter uma bomba de auxílio ao sistema no transporte de água entre coletor e reservatório de armazenamento. De acordo com a legislação em vigor, um sistema solar térmico é definido como sendo um “...sistema composto por um coletor capaz de captar a radiação solar e

*transferir a energia a um fluido interligado a um sistema de acumulação, permitindo a elevação da temperatura da água neste armazenada.” [4]*

De forma a **melhorar o rendimento** da energia fornecida pelo Sol, numa habitação deverá ser instalado o número suficiente de coletores para a energia requerida no dimensionamento e ajustar a inclinação e rastreamento em relação ao Sol. Deverá, ainda, dispor de dois termostatos, um à saída do grupo de coletores e outro no reservatório de armazenamento, de forma a permitir o funcionamento do sistema apenas quando a temperatura no coletor for suficientemente elevada em relação à temperatura no reservatório, no caso de o sistema ser de circulação forçada. As **tubagens** devem ter boa condutividade térmica e ter boa resistência à corrosão, sendo por isso usados preferencialmente materiais como o aço inox e o cobre. Para um bom armazenamento, deve optar-se por um **reservatório** com alta capacidade calorífica, de volume reduzido e equivalente ao consumo diário, seguro e resistente, o qual deve ser integrado num local isolado e pouco sujeito a variações térmicas, evitando que o reservatório esteja sujeito a baixas temperaturas tal como acontece em sistemas com termossifão durante a noite. O reservatório deve ter uma forma cilíndrica e ser disposto, preferencialmente, em posição vertical, pois favorece a estratificação térmica da água. Deve-se evitar armazenar a água durante grandes períodos de tempo e evitar aquecer a água para lá das necessidades para uso [8]. Para obter as características desejadas, e também de forma a reduzir perdas de qualidade da água armazenada, deve-se optar por um reservatório de aço inox ou, alternativamente, de aço com tratamento e com ânodo anti corrosão de magnésio (substituído periodicamente); dessa forma, evita-se a corrosão. O reservatório deve ser resistente à pressão e às variações da temperatura interna, sendo coberto externamente por uma fibra de vidro de forma a ter um bom isolamento térmico [8].

Os sistemas energéticos solares de aquecimento de água podem ser classificados de acordo com a Tabela 1, pela forma de produção de energia e sua aplicação, o princípio operacional, e o meio de trabalho [9] [11] [14].

**TABELA 1 – TIPOS DE CLASSIFICAÇÃO DE SISTEMAS SOLARES DE AQS**

<b>Aplicação</b>	Produção de água quente sanitária (AQS)
	Climatização (aquecimento e/ou arrefecimento) de espaços
	Aquecimento de piscinas
<b>Coletor solar térmico</b>	Placa plana (FPC)
	Parabólico concentrador (CPC)
	Tubo de vácuo (EVC)
<b>Sistema operacional</b>	Circulação natural (termossifão)
	Circulação forçada
<b>Transferência de calor entre coletor e reservatório</b>	Sistema direto
	Sistema indireto
<b>Rastreamento do Sol</b>	Estático
	Eixo único
	Eixo duplo

### 3.2.1 COLETORES SOLARES

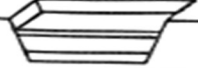
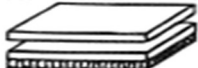
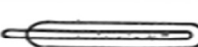
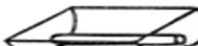
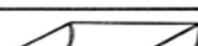
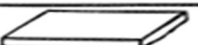
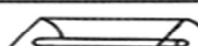


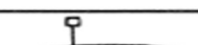
		Collector Type		Concentration Ratio, $C_1$ for Direct Insolation	Indicative Temperature Obtained T (K)		
		Name	Schematic Diagram				
Motion	Stationary	Non-convecting Solar Pond		Flat Absorbers	$C \leq 1$	$300 < T < 360$	
		Flat-plate Absorber			$C \leq 1$	$300 < T < 350$	
		Evacuated Envelope			$C \leq 1$	$320 < T < 460$	
	Solar Tracking	Single Axis	Compound Parabolic Reflector		Tubular Absorbers	$1 \leq C \leq 5$	$340 < T < 510$
			Parabolic Reflector			$5 \leq C \leq 15$	$340 < T < 560$
			Fresnel Refractor			$15 < C < 40$	$340 < T < 560$
			Cylindrical Refractor			$10 < C < 40$	$340 < T < 540$
		Two Axis	Parabolic Dish Reflector		Point Absorbers	$100 < C < 1000$	$340 < T < 1200$
			Spherical Bowl Reflector			$100 < C < 300$	$340 < T < 1000$
			Heliostat Field			$100 < C < 1500$	$400 < T < 3000$

FIGURA 2 - TIPOS DE COLETOR E FATOR DE CONCENTRAÇÃO [26]

Num sistema solar térmico, a transferência de calor faz-se entre a radiação do Sol incidente no coletor e um fluido, ao contrário de outros sistemas de transferência de calor mais utilizados que têm por base a transferência térmica entre fluidos com taxas de transferência de calor elevadas. Para a captação da energia solar pretende-se ter um coletor que absorva o máximo de radiação, como um corpo negro, e que emita pouca, sendo a melhor solução uma superfície seletiva de cor preta ou escura, pois esta cor absorve um maior intervalo de valores de comprimento de onda ( $\lambda$ ).

Em Portugal, tal como na Europa, os coletores solares mais comercializados são os de placa plana. Têm uma construção mais simplificada e têm menores custos associados. Existem, também, coletores parabólicos concentradores, que estão mais dependentes da orientação solar, sendo obrigatório a utilização de rastreadores solares. Já os coletores de tubos de vácuo são mais

utilizados na Ásia, tendo mais ganhos solares em ambientes frios e condições desfavoráveis, permitindo produzir água a temperaturas mais elevadas.

### **COLETORES DE PLACA PLANA**

São os mais utilizados em sistemas de aquecimento de água, aquecimento de espaços, ar condicionado e processos de aquecimento industrial. Este tipo de coletor é caracterizado por absorver radiação direta e difusa, não estando tão dependente da direção do Sol como outros tipos de coletores solares, tem menores custos de instalação, requer pouca manutenção e tem um funcionamento mais simples que outros. É usualmente instalado numa posição fixa ao longo do tempo, otimizada para a localização em questão e para a altura do ano em que se pretenda que o sistema opere. Pode, no entanto, ser integrado num sistema de orientação, que altera a posição do coletor consoante a altura do dia e do ano. Como desvantagens apresenta, em relação aos coletores de tubos de vácuo e parabólicos compostos (CPC's), uma menor eficiência e não consegue atingir temperaturas tão altas [15].

Composição de coletor de placa plana:

- Cobertura transparente
- Placa absorvente/absorsora
- Isolamento
- Tubagem
- Caixa/Estrutura

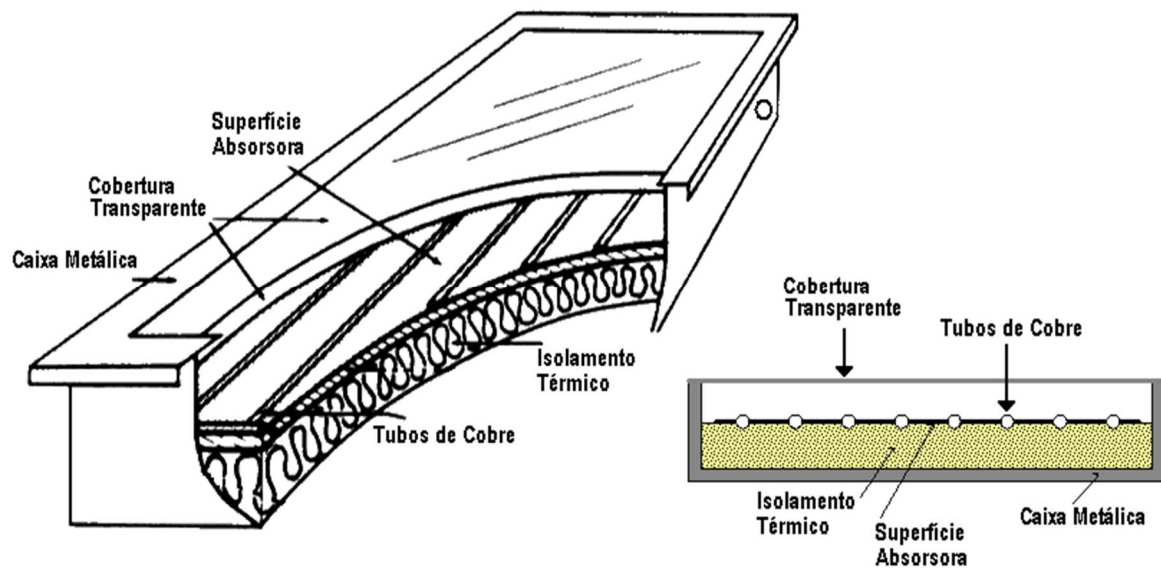


FIGURA 3 - COLETOR SOLAR PLANO [27]

A **cobertura transparente** permite que a energia irradiada pelo Sol que lhe incide fique retida, pois está feita de forma a que a radiação solar, que tem um comprimento de onda compreendido entre 0,25 e 2,50  $\mu\text{m}$  [8], com o espectro descrito na Figura 3, atravesse e aqueça a placa absorvedora que, ao aquecer, vai emitir radiação com um comprimento de onda maior, ao qual a cobertura é opaca, ficando a radiação retida no interior do coletor, provocando o efeito de estufa. Este efeito reduz as perdas térmicas por convecção e serve de estanque, não permitindo o vazamento do ar presente no interior do coletor nem a entrada de humidade e/ou partículas.



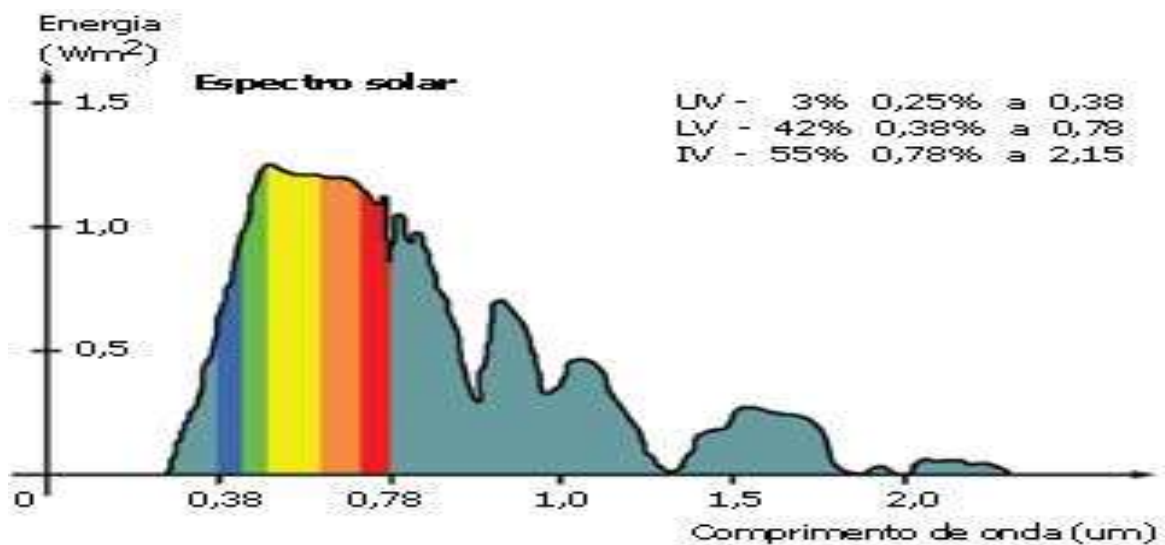


FIGURA 4 - ESPECTRO DA RADIAÇÃO SOLAR [28]

A cobertura é feita normalmente a partir de vidro ou material plástico (ex. acrílico), materiais estes com um alto coeficiente de transmissão da radiação solar e baixo coeficiente de transmissão de ondas longas, permitindo assim a passagem da radiação solar e servindo de estanque à radiação de comprimentos de onda maiores [16]. Têm, também, baixo coeficiente de condutividade térmica e alto coeficiente de reflexão para grandes comprimentos de onda, evitando perdas térmicas e melhorando o rendimento, têm baixo coeficiente de dilatação, reduzindo riscos de quebra quando sujeitos a variações térmicas [16]. Em relação ao plástico, há riscos de deterioração física e instabilidade química, e o vidro poderá ser de cobertura simples ou dupla podendo, neste último caso, sofrer tratamentos especiais como antirreflexo na cobertura exterior e tratamento à cobertura interna para que esta reflita radiação de comprimentos de onda maiores [15]. A **placa absorvente** retém a energia calorífica da radiação, transmitindo-a para o fluido que circula no interior da tubagem, que se encontra em contacto com a placa absorvente. Deverá ser composta por superfícies seletivas pintadas de preto ou uma tinta escura de forma a obter um alto coeficiente de absorção, o mais próximo possível das características ideais de um corpo negro, tendo ao mesmo tempo um baixo coeficiente de emissão. A **tubagem** é feita de material com grande condutividade térmica, que favorece a rápida transferência de calor (ex: cobre, alumínio). O **isolamento** pretende evitar ou minimizar perdas térmicas para o exterior, principalmente, as perdas de calor por condução [17], resistir a altas temperaturas e ao envelhecimento sem deteriorar e suportar a humidade produzida no interior do coletor [16]. Os materiais mais indicados são a lã de vidro, a lã

de rocha, o poliuretano ou a cortiça. A **estrutura** tem como objetivo proteger e fixar todos os componentes do coletor, dar-lhe alguma resistência, estabilidade e servir de isolante térmico. Deve ainda servir de suporte do coletor à estrutura onde se encontra montado.

## **COLETORES CONCENTRADORES**

Existem vários modelos de coletores, podendo os concentradores ser refletores ou refratores, cilíndricos ou superfícies de revolução, contínuos ou segmentados. A parte recetora do coletor pode ser convexa, plana ou côncava, e com ou sem cobertura [17]. Há também vários tipos de rastreamento da radiação solar e diferentes fatores de concentração (taxas de área de abertura do coletor em relação à taxa de área da superfície absorvente). Apesar das diversas variações que os coletores concentradores podem ter, eles são normalmente divididos em 2 grupos: coletores não formadores de imagem (anidólicos) e coletores formadores de imagem. Coletores sem formação de imagem têm baixa taxa de concentração, e não produzem uma imagem clara e definida do Sol sobre a superfície absorvente enquanto coletores com formação linear de imagem têm taxas intermédias de concentração que permitem a obtenção de maiores temperaturas.

Quanto maior for a temperatura requerida para o sistema, maior terá de ser o fator de concentração. Concentradores com superfícies absorventes muito pequenas, em relação ao ângulo de abertura, estão mais dependentes da radiação direta, ângulo de incidência solar e rastreamento solar. O fator de concentração é determinado pela área de abertura do sistema ótico ( $A_a$ ) em relação à área da superfície absorvente ( $A_r$ ). O fator de concentração é tanto maior quanto maior for a abertura do sistema ótico em relação à área absorvente, ver Figura 2, e é dado pela Equação 1.

$$C = C_{geo} = \frac{A_a}{A_r} \quad (1)$$

### Coletores Parabólicos Concentradores (CPC)

São o tipo de coletor concentrador mais utilizado, e com maior eficiência, tanto a altas diferenças de temperatura como em épocas de pouca radiação (ex. inverno). São mais caros que os coletores planos. Estes coletores têm a particularidade de utilizar um sistema ótico (concentrador) entre a fonte de radiação e a superfície absorvente. Isto permite concentrar a radiação numa área menor, possibilitando a redução da área da superfície absorvente de energia

(recetor), que conseqüentemente reduz as perdas térmicas associadas à superfície absorvente, podendo assim obter temperaturas mais elevadas que os coletores de placa plana, até cerca de 70 °C. Estes coletores têm, também, maior capacidade de absorção de radiação difusa que os coletores planos.

Em comparação com os coletores planos, os C.P.C. têm a desvantagem de maior dependência da orientação do Sol, sendo obrigatório o rastreamento do Sol para obter uma boa eficiência do sistema, pois de outra forma a radiação não seria bem reorientada entre o sistema ótico e a superfície absorvente. Requerem uma maior manutenção que os coletores de placa plana, maioritariamente por causa do sistema ótico, pois este, a longo prazo, vai perdendo qualidade com a retenção de sujidade, condições climáticas e atmosféricas e oxidação ou corrosão.

Composição de coletor parabólico concentrador (C.P.C.):

- Sistema ótico (concentrador):
  - Refletores
  - Alhetas
- Superfície absorvente (tubos de cobre)
- Cobertura transparente
- Isolamento
- Caixa/Estrutura

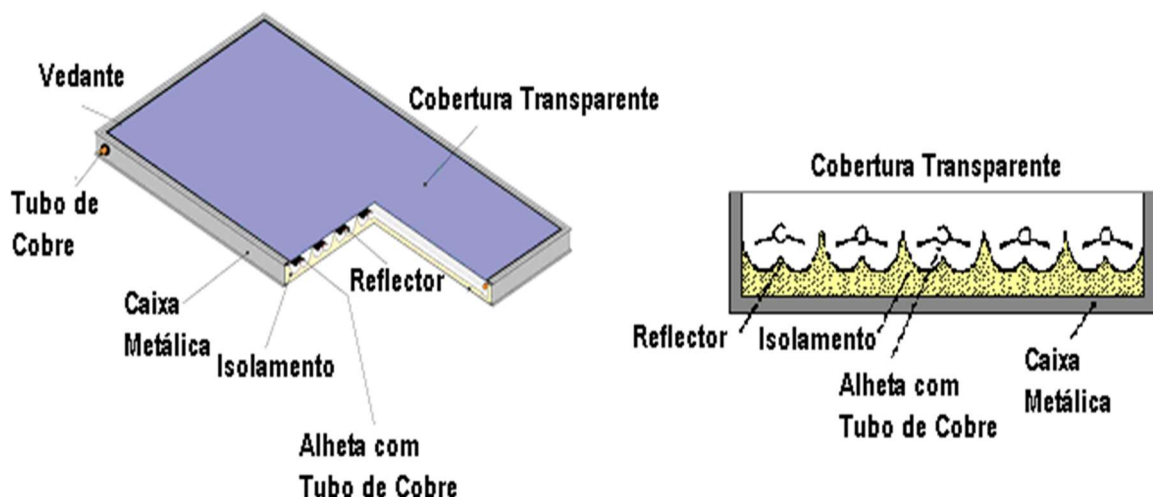


FIGURA 5 - COLETOR PARABÓLICO CONCENTRADOR [27]

## COLETOR DE TUBOS DE VÁCUO

Este tipo de coletor contém um conjunto de tubos de vidro de parede dupla, que contém no seu interior uma camada de material seletivo (ex.: cobre, aço inox e nitreto de alumínio), e tubos de cobre por onde passa a água. Estes tubos de vidro são sujeitos a vácuo (é retirado o gás do seu interior), tendo pressões reduzidas no seu interior, cerca de  $10^{-5}$  bar [15]. Esta composição permite ter menores perdas térmicas globais que outros tipos de coletores, sendo as perdas térmicas por condução quase nulas. Tem um maior coeficiente de transferência de calor para os tubos de cobre no seu interior. Apesar de apresentarem menores perdas térmicas têm também eficiência ótica mais baixa que os outros coletores, e são mais caros que um coletor plano [15]. De todos os coletores solares térmicos este é o mais apropriado para a obtenção de temperaturas mais elevadas, podendo atingir temperaturas na ordem dos 60 ° a 80 °C.

A energia térmica é captada pela utilização de um fluido refrigerante presente no interior dos tubos de cobre que recebe calor, até atingir o ponto de ebulição. Aí ele sobe pelo tubo até atingir o topo onde há permuta de calor e o fluido condensa, descendo, por gravidade, de volta ao fundo do tubo.

Composição de coletor de tubos de vácuo:

- Tubos de vidro de parede dupla
- Camada seletiva
- Tubos de cobre

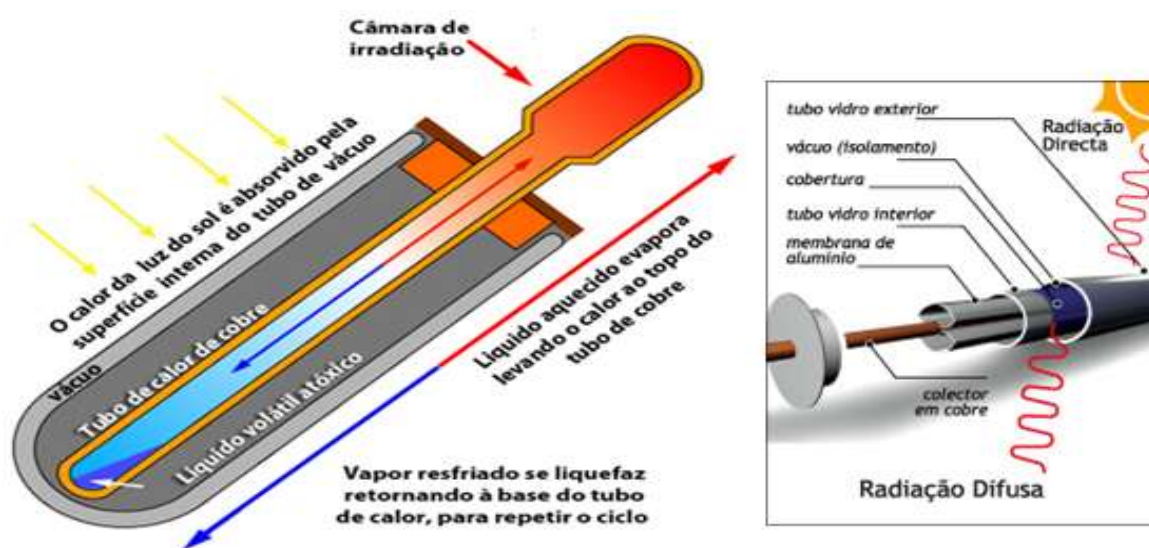


FIGURA 6 - COLETOR DE TUBOS DE VÁCUO. FONTE: [HTTP://WWW.MARLA.PT/PAINEIS-VACUO.PHP](http://www.marla.pt/paineis-vacuio.php)

### 3.2.2 RASTREAMENTO SOLAR

Um sistema solar, em termos de rastreamento solar, pode ser de coletor estático, ou de rastreamento de eixo único ou de eixo duplo. Num sistema estático procura-se instalar o coletor solar com um ângulo otimizado para o local da instalação, tendo em consideração a variação do posicionamento do Sol ao longo do dia e ao longo do ano, variações na altitude, relevo, clima da região [18] e também a finalidade da implantação do sistema solar e a previsão da variação das necessidades de consumo relativas ao sistema ao longo do dia e do ano. Um sistema de eixo único tem a capacidade de rastrear o Sol segundo o eixo Este-Oeste, acompanhando o Sol entre o nascer e o pôr-do-Sol. Esta é a opção mais utilizada, pois é segundo este eixo que se observa a maior variação da posição do Sol. Neste caso, a taxa de rotação deve ser de 15º/h, desde o nascer até ao pôr-do-Sol. É, também, possível rastrear o Sol segundo o eixo Norte-Sul, reduzindo assim as perdas associadas à variação da posição do Sol entre os solstícios de verão e de inverno. No sistema de eixo duplo o rastreamento do Sol é otimizado ao máximo, assegurando a movimentação segundo os eixos Este-Oeste e Norte-Sul. Neste caso, são necessários dois motores, um para cada eixo, ao passo que no sistema de eixo único é necessário apenas um motor e no sistema estático não é necessário nenhum. Nos sistemas com rastreamento, apesar de terem maior eficiência na absorção da energia solar, tem que se ter em consideração a presença de motores e do sistema de medição que aumentam o custo, a carga energética consumida e, também, o espaço e manutenção extra [18].

### 3.2.3 TRANSFERÊNCIA DE CALOR: COLETOR – RESERVATÓRIO

A transferência de calor do coletor solar para o reservatório de água pode-se dar de forma direta, onde é necessário apenas um circuito, ou indiretamente com dois circuitos ligados por um permutador.

#### 3.2.3.1 SISTEMA DIRETO

A água proveniente da rede é aquecida pelo coletor e de seguida é enviada para consumo, sendo todo o processo feito num único circuito. Tem a vantagem de ter fabrico e instalação mais económica. Inicialmente, a troca de calor tem maior rendimento do que num sistema indireto, mas há maiores riscos de poluir a água e risco de corrosão ou incrustação do circuito, que a longo prazo fazem reduzir o rendimento térmico do sistema. Terá de ser instalada uma válvula redutora de pressão para evitar pressões altas no circuito, e há maiores riscos de congelação em zonas frias [8].

É recomendado que não seja aplicado este tipo de circuito em zonas propensas a temperaturas muito baixas, reduzindo o risco de congelação ou, no caso de zonas frias, reduzir a quantidade de água no circuito, pois a dilatação associada à formação de gelo pode provocar danos aos equipamentos [19].

### 3.2.3.2 SISTEMA INDIRETO

Neste sistema recorre-se à adição de um circuito fechado com permutador colocado entre o coletor e o circuito primário (composto pela água para consumo, proveniente da rede). Neste circuito passa um fluido pressurizado, podendo ser água ou uma mistura de água com anticongelante (ex. glicol), sendo que este fluido não se mistura com a água da rede. O circuito composto pela água proveniente da rede entra em contacto térmico com o permutador do circuito fechado, em vez de passar pelos coletores, permitindo a transferência de calor. Este sistema é relativamente mais caro e tem maiores perdas térmicas, mas inibe a degradação do sistema e a contaminação da água causada por reservatórios de calcário ou corrosão.

A mistura usada acabará por ter propriedades físicas diferentes da água. Uma maior concentração de anticongelante resulta na diminuição da temperatura de congelação, e também na diminuição do calor específico do fluido, reduzindo a eficiência de transferência e de transporte de calor.

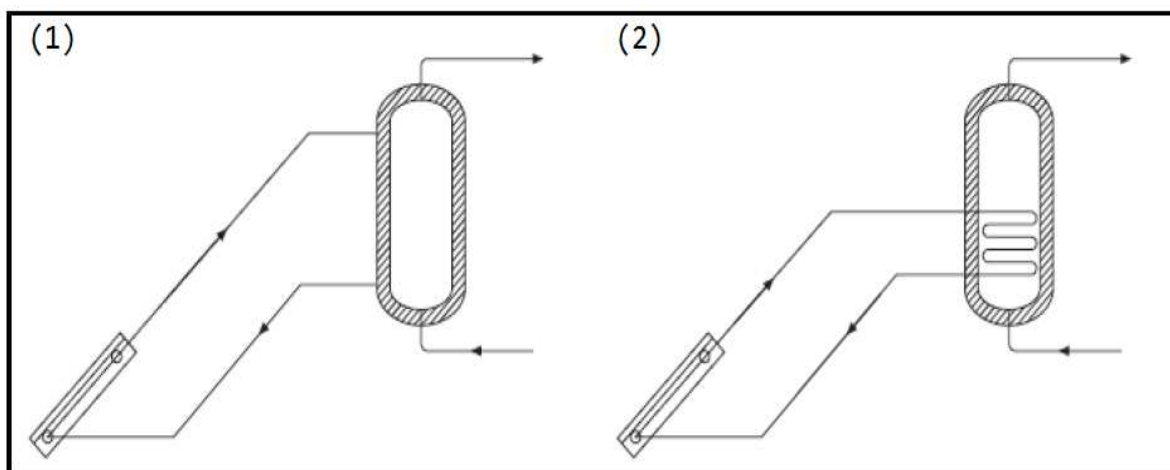


FIGURA 7 - SISTEMA SOLAR (1) DIRETO (2) INDIRETO [19]

### 3.2.4 SISTEMA DE OPERAÇÃO

A forma como o calor é captado dos coletores para o reservatório de armazenamento pode-se realizar por circulação natural ou circulação forçada. A circulação natural é instalada em casos em que é possível colocar o reservatório acima do coletor ao passo que a circulação forçada necessita de uma bomba que permita a circulação da água.

#### 3.2.4.1 CIRCULAÇÃO NATURAL - TERMOSSIFÃO



FIGURA 8 - SISTEMA SOLAR TÉRMICO COM CIRCULAÇÃO EM TERMOSSIFÃO [29]

Este sistema é livre de fonte de energia mecânica externa. É apenas composto por um ou mais coletores de energia solar e por um reservatório, que terá de ser colocado a uma cota superior à dos coletores [20], sendo usualmente colocado no telhado, acima dos coletores, sendo de difícil integração arquitetónica. Este é um sistema independente de partes mecânicas e controlos eletrónicos, pois a transferência de calor dá-se por convecção natural e é autorregulado. A água quente tem densidade inferior à água fria, obrigando à subida da água mais quente até ao reservatório, levando a que da mesma forma a água mais fria permaneça no coletor e aqueça. Devido à ausência de consumos de eletricidade e falta de partes mecânicas e controlos eletrónicos, a instalação e manutenção deste sistema é bastante mais barata e simples.

Neste sistema o caudal de água está diretamente dependente da radiação disponível e, por isso, o caudal tende a ser inferior ao de circulação forçada, apesar de ser possível obter maiores amplitudes térmicas, sendo melhor adaptado para instalações solares de baixo consumo. Outro problema que pode ocorrer é a inversão da circulação da água em períodos longos sem exposição solar (noite); nesses períodos o coletor funciona como dissipador de energia [8], arrefecendo

consequentemente a água disponível no reservatório. Há, contudo, formas de o evitar, optando por dar uma inclinação mínima de 30% ao coletor ou instalar uma válvula antirretorno.

#### 3.2.4.2 CIRCULAÇÃO FORÇADA – COM AUXÍLIO DE UMA BOMBA

É necessária quando, por algum motivo, o reservatório de água se encontra abaixo dos coletores solares. Nestes casos, o reservatório pode-se instalar num local mais abrigado, como o interior da habitação, reduzindo assim as perdas térmicas associadas ao arrefecimento pelo ar ambiente durante a noite. Aqui recorre-se a uma bomba de circulação que movimenta a água fria desde o reservatório até à altura do coletor, bomba esta que tem sempre um consumo energético associado [20]. A utilização da bomba aumenta o rendimento do sistema pois permite a regulação do caudal de água aquecido, podendo-se optar por maiores caudais a temperaturas ligeiramente mais baixas que em sistemas de circulação natural. Para isso são instalados termostatos de controlo, que só permitem que a bomba (electro circulador) funcione quando haja ganhos térmicos. As sondas dos termostatos são instaladas na parte superior do coletor e na parte inferior do reservatório (onde a temperatura da água, devido à estratificação térmica, é mais baixa), e apenas quando a água à saída do coletor for superior à da temperatura medida pela sonda no reservatório é que a bomba entra em funcionamento.

Este sistema requiere, normalmente, um investimento inicial superior em relação ao sistema solar térmico com termosifão, tem gastos energéticos associados à bomba de circulação do fluido entre os coletores e o reservatório, e tem, por norma, maiores gastos anuais em manutenção, pois o sistema é mais complexo. Neste caso a circulação é pressurizada, e os componentes, tal como a bomba de circulação e o controlador de caudal, estão mais sujeitos a avarias.



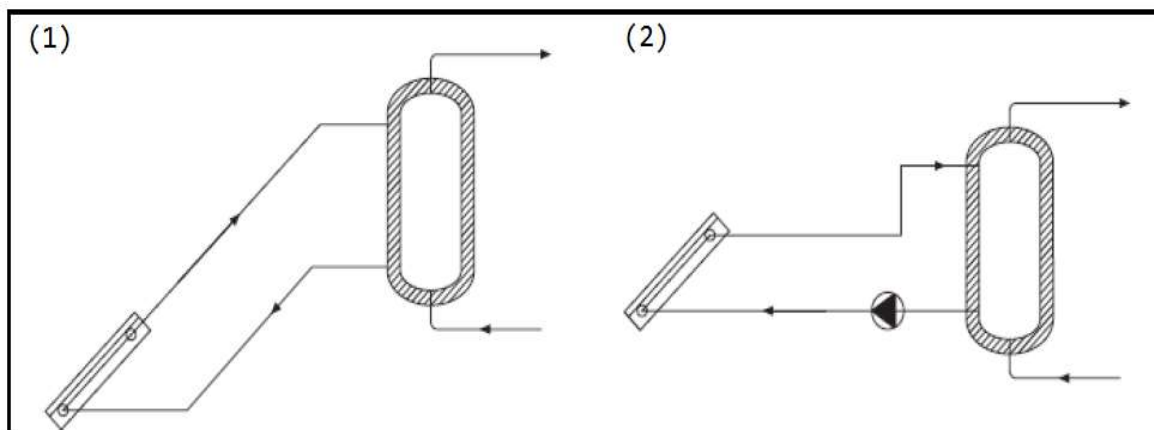


FIGURA 9 - SISTEMA SOLAR DE (1) CIRCULAÇÃO NATURAL (2) CIRCULAÇÃO FORÇADA [19]

### 3.3 SISTEMA SOLAR TERMODINÂMICO

Apesar de ser tratado por sistema solar, este sistema obtém calor a partir do meio ambiente, sendo a radiação solar um dos fatores que menos influencia o seu desempenho. Alia os benefícios de duas tecnologias: o sistema solar térmico e a bomba de calor. É um sistema baseado no ciclo de refrigeração operando com bomba de calor, em que é aplicado um trabalho elétrico (compressor) a um fluido que capta energia térmica do ambiente por meio de um coletor solar, e que é transferida para a água da rede através de um permutador de calor.

São majoritariamente utilizados para o aquecimento de AQS, climatização de espaços e aquecimento de piscinas. Para a instalação de um sistema solar termodinâmico numa habitação é necessário considerar o local mais propício à instalação, tendo em conta a melhor orientação e inclinação do coletor, distância mínima entre o painel e o termoacumulador, ter junto ao termoacumulador ligação à rede elétrica, ter acesso a água da rede, ter ponto de água quente, e ter ponto de retorno e esgoto.

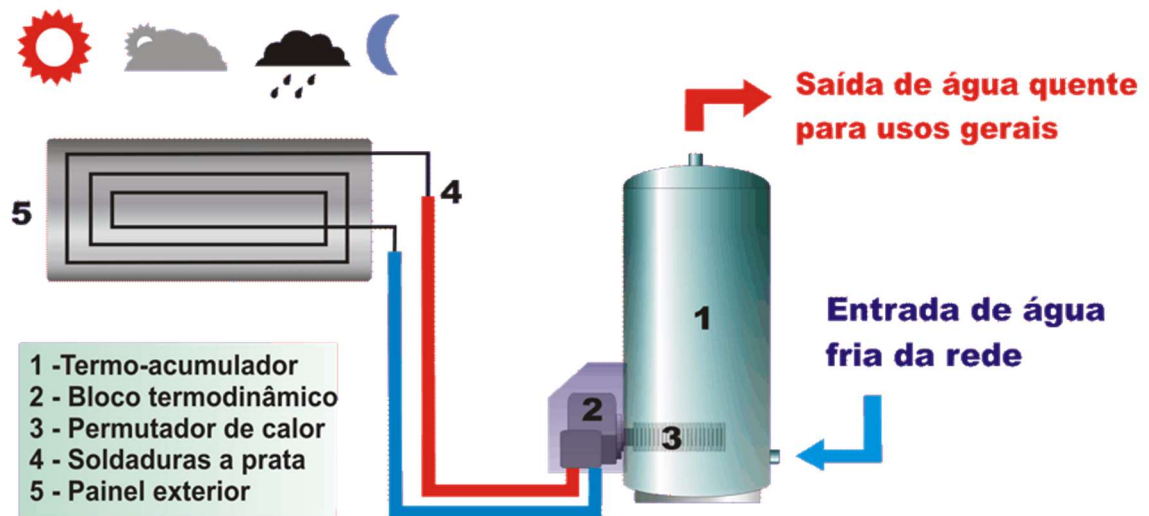


FIGURA 10 - SISTEMA SOLAR TERMODINÂMICO, DISPONÍVEL EM [HTTPS://RJAFONSO.FILES.WORDPRESS.COM/2011/05/ESQUEMA\\_ECO300.GIF](https://RJAFONSO.FILES.WORDPRESS.COM/2011/05/ESQUEMA_ECO300.GIF)

Composição do sistema solar termodinâmico, figura 10:

- Coletor solar termodinâmico
- Bloco termodinâmico:
  - Compressor
  - Reservatório do fluido refrigerante
  - Válvula de expansão
  - Grupo de segurança
  - Permutador de calor (condensador)
- Termoacumulador
- Tubagem de cobre entre o coletor e o bloco termodinâmico
- Tubagem para circulação da água

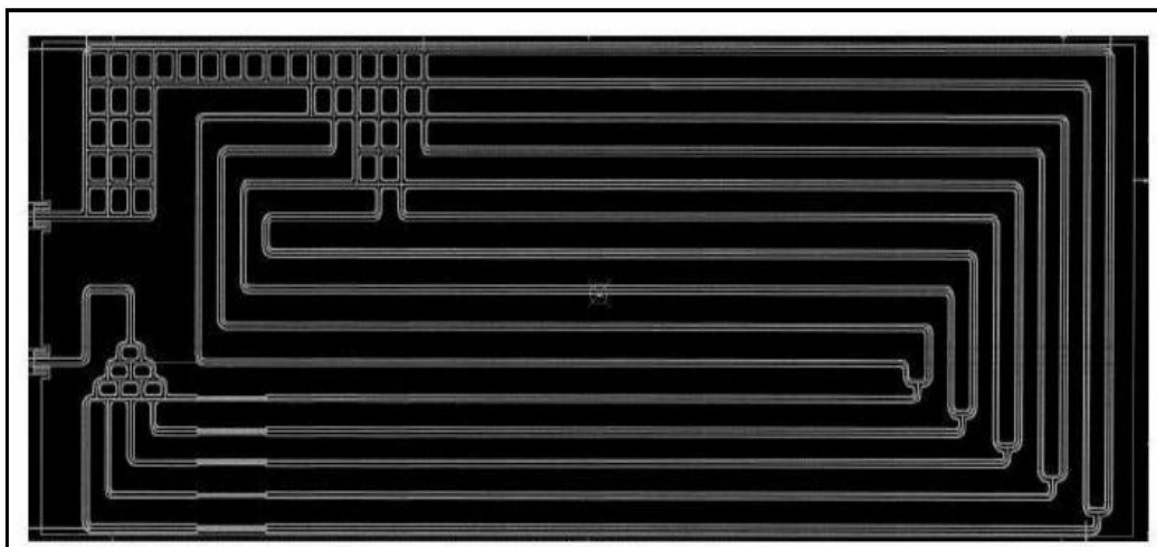


FIGURA 11 - COLETOR SOLAR TERMODINÂMICO [19]

Os **coletores solares termodinâmicos** são constituídos por um corpo em alumínio e um circuito integrado no corpo do coletor em cobre, tal como ilustrado na Figura 11, que permite a circulação do fluido refrigerante no seu interior. Para evitar a corrosão são galvanizados com uma fina camada de zinco e cobertos por uma pintura anti corrosão negra [19]. A ausência de vidro, comparativamente aos coletores térmicos, permite aumentar as trocas térmicas por convecção com o ar ambiente.

A instalação do coletor está dependente de 4 fatores: orientação solar, inclinação, integração arquitetónica e fixação. Em Portugal o coletor deverá estar orientado preferencialmente para Sul, em direção ao equador, ou seja, azimute solar de  $0^\circ$ . A inclinação estará dependente da latitude geográfica, estando Portugal entre  $36^\circ$  e  $42^\circ$ , hemisfério norte, juntamente com a variação sazonal do solstício de verão e de inverno, que atingem uma variação máxima de  $23.5^\circ$  quando atingem os trópicos de Câncer e de Capricórnio, respetivamente. Deve então, em Portugal, o painel ser instalado com uma inclinação entre  $10^\circ$  a  $90^\circ$  em relação à superfície, não havendo um ângulo fixo, podendo ser ligeiramente ajustado de acordo com as necessidades de consumo estimadas para uma melhor performance numa determinada época do ano. Para uma melhor estética os painéis deverão ser instalados em telhados, varandas, paredes ou solo. Podem ser instalados com uma inclinação entre  $10^\circ$  a  $90^\circ$  em relação à horizontal, podendo, ao contrário dos painéis solares térmicos, ser instalado em superfícies verticais e fachadas [19].

O **bloco termodinâmico** contém um compressor ligado à rede elétrica, que comprime o vapor refrigerante que provém dos coletores, aumentando a sua pressão e temperatura, provocando a condensação do vapor refrigerante, seguindo para um permutador de calor (condensador) que a partir daí cede calor à água da rede. O **fluido refrigerante** deve ser capaz de absorver calor a partir da temperatura ambiente, mesmo com temperaturas baixas, sendo para isso benéfico que possua um ponto de ebulição bastante baixo, e consiga absorver grandes quantidades de calor. Deve igualmente ter boa estabilidade química quando sujeito a diferenças de pressão e temperatura, ser incombustível, não corrosivo e não tóxico ou prejudicial à camada de Ozono (CFC's) [19]. Os fluidos mais utilizados são os R-134a e o R-407c. Para uma melhor transferência de calor é utilizada **tubagem** em cobre em todo o circuito do fluido, pois tem grande condutividade térmica e tem, também, grande resistência à corrosão. O **termoacumulador**, tal como o reservatório do sistema solar térmico, deverá ter uma forma cilíndrica, ser instalado na vertical para favorecer a estratificação térmica no seu interior, deve ser dimensionado para o volume de consumo diário de AQS, e ser feito de material anticorrosivo como o aço inox. O **permutador (condensador)** permite a transferência de calor entre o fluido refrigerante comprimido proveniente do compressor para a água da rede. Devido ao perigo de perdas ou rotura da tubagem do circuito do fluido refrigerante é aconselhável que o permutador não seja instalado no interior do termoacumulador, para que a água acumulada não seja contaminada em caso de fuga de refrigerante [19]. A **válvula de expansão** permite o abaixamento de pressão associado ao funcionamento do sistema.

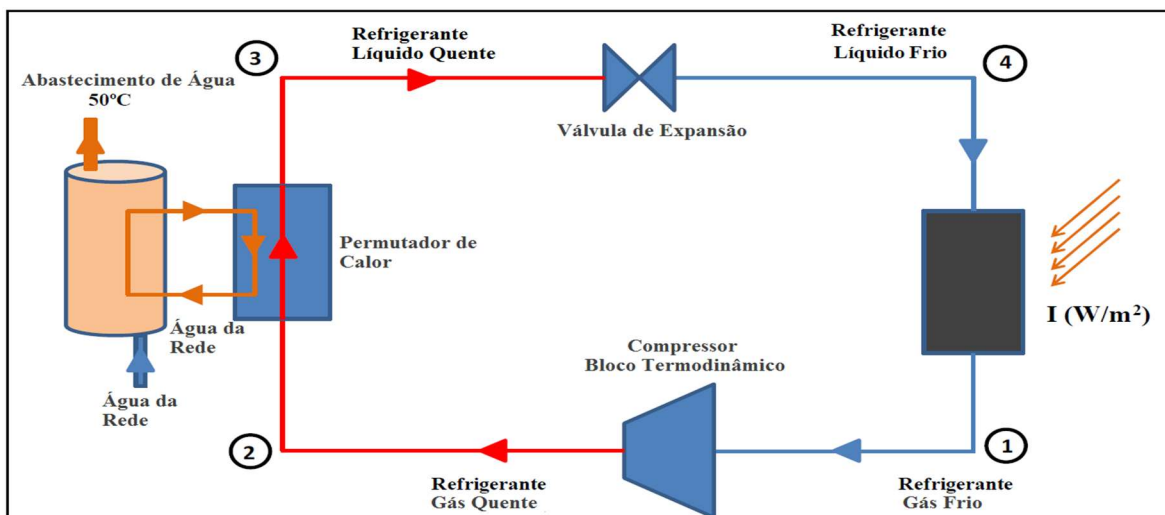


FIGURA 12 - PRINCIPIO DE FUNCIONAMENTO DO SISTEMA SOLAR TERMODINÂMICO [19]

Num sistema solar termodinâmico o refrigerante é sujeito aos processos usuais de uma bomba de calor por compressão de vapor, tal como ilustrado na Figura 12.

Tendo descrito os sistemas solares, considerados neste trabalho, é tempo de proceder à simulação dos diferentes sistemas tendo em conta os dados meteorológicos, obtendo resultados teóricos para a performance e desempenho de cada um.



## CAPÍTULO IV: SIMULAÇÃO DE SISTEMAS SOLARES

Devido às diferentes características dos sistemas solares de AQS comparados neste trabalho, definiu-se como critério de seleção: a quantidade de energia térmica fornecida pelo sistema, os consumos energéticos operacionais, o payback e o Valor Atualizado Líquido (VAL). Pode-se assim fazer a comparação tanto em termos energéticos como em termos financeiros.

### 4.1 SOFTWARE RETSCREEN®

Para obter uma estimativa sobre a quantidade de energia produzida por um sistema solar térmico recorreu-se à modelação com o *software* RETScreen 4, que se baseia no método *f-chart*. É um *software* de análise de projetos de eficiência energética e energias renováveis, desenvolvido pelo governo do Canadá, estando disponível gratuitamente, e sendo baseado no Excel.

O dimensionamento de um sistema solar pretende fornecer ao consumidor a melhor opção, tendo em consideração o consumo médio de AQS na habitação, a temperatura e quantidade de radiação disponível no local, características do sistema solar e do sistema de apoio, e fatores financeiros como o investimento inicial e custos de manutenção, fornecendo os dados descritos na Figura 13, que facilitam a decisão de viabilidade de um projeto. Teoricamente, pretende-se obter uma fração solar média anual perto dos 75 %, pois a eficiência no inverno é menor, devido à menor radiação incidente, e assim evita-se que a fração solar no verão não entrapasse os 100 %. Deste modo, obtém-se uma maior percentagem de energia térmica produzida a partir de fonte solar, e ao mesmo tempo obtém-se um menor investimento inicial e menor payback, desta forma o investimento é mais viável e evita-se, também, que o sobredimensionamento do sistema cause o sobreaquecimento dos componentes em períodos com maiores níveis de radiação, levando à redução do seu tempo de vida útil.

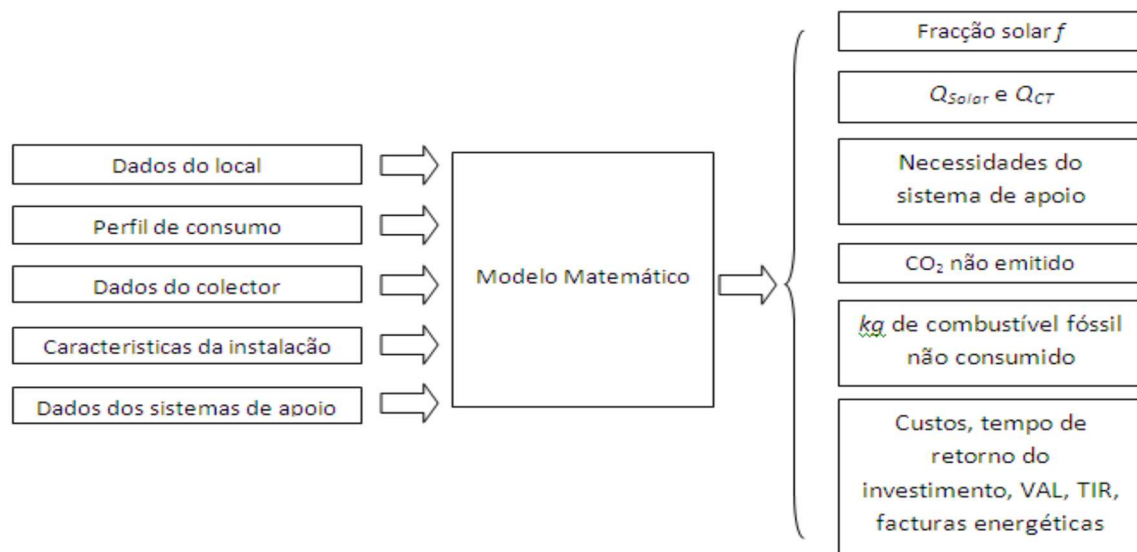


FIGURA 13 - MODELO MATEMÁTICO RETSCREEN [30]

O RETScreen está já capacitado com dados meteorológicos de várias cidades do Mundo, bastando para isso que seja selecionada a cidade pretendida para a análise do projeto. Estes dados provêm de estações de monitorização meteorológica e dos satélites de análise de dados da NASA. Neste *software*, para AQS, são tidas em consideração médias mensais da temperatura do ar, radiação solar, temperatura da água de rede e quantidade de AQS necessária para a habitação em questão. Estes dados permitem calcular a eficiência do coletor e a quantidade de energia coletada, as perdas térmicas e a quantidade de energia necessária para aquecer a água de rede até à temperatura de referencia da AQS [9]. Os cenários propostos foram simulados em relação às localidades de Bragança a 41,8°N -6,7°E, Coimbra a 40,2°N -8,4°E e Faro a 37,0°N -8,0°E, com os dados meteorológicos descritos na Tabela 2. Foram selecionadas estas localidades, pois, de certa forma, Bragança e Faro representam as condições meteorológicas extremas a nível nacional enquanto Coimbra que se situa na zona centro representa condições médias em relação a todo o território nacional.



TABELA 2 - DADOS METEOROLÓGICOS. FONTE: RETSCREEN/NASA

Mês	Temperatura média do ar			Radiação solar diária – horizontal		
	°C			kWh.m <sup>-2</sup> . d <sup>-1</sup>		
	Bragança	Coimbra	Faro	Bragança	Coimbra	Faro
<b>Janeiro</b>	4,5	10	11,9	1,70	1,98	2,55
<b>Fevereiro</b>	5,9	11	12,6	2,63	2,9	3,31
<b>Março</b>	8,0	12,5	13,7	3,99	4,38	4,75
<b>Abril</b>	10,0	14	15,1	5,15	5,45	5,99
<b>Mai</b>	13,4	16,4	17,5	6,28	6,07	7,22
<b>Junho</b>	17,7	19,6	20,6	7,14	6,42	7,65
<b>Julho</b>	21,1	21,8	23,3	7,57	6,81	7,77
<b>Agosto</b>	20,8	21,8	23,4	6,61	6,23	6,91
<b>Setembro</b>	18,3	20,8	21,8	4,96	4,7	5,51
<b>Outubro</b>	13,1	17,4	18,7	3,05	3,55	3,99
<b>Novembro</b>	8,0	13	15,1	2,00	2,46	2,79
<b>Dezembro</b>	5,0	10,4	12,7	1,40	2,17	2,26
<b>Anual</b>	12,2	15,75	17,2	4,38	4,44	5,07

Os dados referentes à tabela 2 indicam que a temperatura do ar em Bragança é bastante mais baixa durante os meses de inverno e a radiação solar em Bragança ultrapassa os valores da de Coimbra durante o período maio a setembro.

Para a análise energética de um projeto basta selecionar o “tipo de projeto” pretendido e a “tecnologia” requerida de uma base de dados incluída no *software*, que neste caso foi “Produção de calor” e “Aquecedor solar de água” respetivamente. Para o cálculo do modelo energético do sistema solar térmico foram considerados os seguintes pressupostos. Considerou-se uma casa com 4 habitantes e 100% de taxa de ocupação, a ser utilizada 365 dias de consumo por ano, ou seja, 7 dias por semana, com temperatura de referência de AQS de 55 °C e temperatura de referência da água da rede de 10 °C como estipulado pelo Regulamento (EU) n.º 814/2013.

O consumo médio diário está estipulado segundo o Quadro 1 do Anexo III do Regulamento (EU) n.º 814/2013, sendo, para o caso de uma família de 4 elementos, recomendado o perfil de carga L dos aquecedores de água presente no Anexo A deste trabalho.

O perfil de carga L estipula que o consumo diário de AQS numa habitação se divide em 4 tarefas com diferentes caudais de água associados: o banho (10 L/min), o duche (6 L/min), a máquina de lavar loiça (4 L/min) e outros consumos associados a pequenas tarefas e limpeza (3 L/min). O perfil L indica o caudal e o calor necessário a cada tarefa (Anexo A) mas não nos indica o tempo de realização de cada tarefa e desta forma não temos o caudal de AQS diário necessário, que é necessário fornecer como *input* na simulação do Retscreen. De forma a encontrar o caudal de AQS diário é necessário recorrer à Equação 2.

$$\dot{Q}_{tap} = \frac{Q_{tap}}{\Delta t} \rightarrow Q_{tap} = \dot{m}_{\text{água}} C_{p\text{água}} \Delta T \Delta t \leftrightarrow \Delta t = \frac{Q_{tap}}{\dot{m}_{\text{água}} C_{p\text{água}} \Delta T} \quad (2)$$

De acordo com o Anexo A, para o perfil L, a tarefa de banho necessita um consumo energético,  $\dot{Q}_{tap}$ , de 3,605 kWh (3605 Wh) por utilização e um caudal de 10 L/min (0,167 kg/s), sendo a diferença térmica de 45 K ((55° + 273) - (10° + 273)). Sabendo que o calor específico da água é de 4190 (J/(kg.K)), resulta, de acordo com a Equação 2, um tempo de utilização de 0,115 h.

$$\Delta t_{\text{banho}} = \frac{3605}{0,167 \times 4190 \times 45} = 0,115 \text{ h} = 413 \text{ s}$$

Relativamente ao duche, é necessário 1,4 kWh (1400 Wh) e um caudal de 6 L/min (0,1 kg/s).

$$\Delta t_{\text{duche}} = \frac{1400}{0,1 \times 4190 \times 45} = 0,074 \text{ h} = 267 \text{ s}$$

Quanto à utilização da máquina de lavar loiça, são necessárias 2 utilizações por dia, uma com necessidades energéticas de 0,735 kWh (735 Wh), e outra de 0,315 kWh, ambas com um caudal de 4 L/min (0,067 kg/s).

$$\Delta t_{\text{máq lavar}} = \frac{735 + 315}{0,067 \times 4190 \times 45} = 0,058 + 0,025 = 0,084 \text{ h} = 301 \text{ s}$$

Finalmente, para consumos diversos (outros), é necessários 0,105 kWh (105 Wh), e caudal de 3 L/min (0,05 kg/s).

$$\Delta t_{outros} = \frac{105}{0,05 \times 4190 \times 45} = 0,011 \text{ h} = 40 \text{ s}$$

Considerando que há, de acordo com o Perfil L, 2 banhos diários, 1 duche, 2 lavagens com máquina de lavar loiça e 19 utilizações em outros consumos, recorreremos à Equação 3 para encontrar o consumo diário de AQS total.

$$\begin{aligned} \text{Consumo diário} &= \sum_i n_i \Delta t_i \dot{m}_i \\ &= (2 \times 413 \times 0,167)_{banho} + (1 \times 267 \times 0,1)_{duche} \\ &+ (1 \times 301 \times 0,067)_{máq \text{ lavar}} + (19 \times 40 \times 0,05)_{outros} = 222 \text{ kg}_{\text{água}} \\ &= 222 \text{ L}_{\text{água}} \end{aligned} \quad (3)$$

TABELA 3 - CONSUMO AQS. FONTE: RETSCREEN

Características da carga	Unidade	Caso de referência
Tipo de carga		Casa
Número de unidades	Ocupante	4
Taxa de ocupação	%	100%
Uso diário de água quente	L/d	222
Temperatura de referência	°C	55
Dias de operação por semana	d	7
Pedido de Calor Anual	kWh	4254

O consumo diário de AQS de 222 L (0,062kg/s), de acordo com o perfil de carga L, descrito na Tabela 3, requer 11,655 kWh/dia, ou seja, 4254 kWh/ano.

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{\text{anual}} &= \dot{m}_{\text{água}} C_{p_{\text{água}}} \Delta T = (0,062 \times 4190 \times 45) \times 365 = 11,655 \times 365 \quad (4) \\ &= 4254 \text{ kWh} \end{aligned}$$

Em todos os cenários de sistemas solares térmicos foi considerado que os painéis solares não têm rastreamento solar, são fixos, o mais comum entre painéis solares térmicos de placa plana, uma inclinação ( $\beta$ ) de  $35^\circ$  em relação à horizontal e azimute ( $\gamma$ ) de  $0^\circ$ , ou seja, posicionados para Sul. Relativamente ao tipo de coletor solar térmico, o *software* RETScreen dá-nos a escolher entre vários modelos existentes no mercado, tendo, cada um, diferentes parâmetros. Estes parâmetros, tal como o tipo de armazenamento do sistema, variaram consoante o cenário proposto neste trabalho.

Foi considerado como sistema de apoio um termoacumulador elétrico com eficiência ( $\eta$ ) de 0.95. Para a simulação foram utilizados dados de acordo com os preços de referência no mercado liberalizado praticados no mês de Julho de 2016 (ENAT – Eletricidade), para uma tarifa simples contratada de 6.9 kVA, tem um preço de 0,1618 €/kWh [21].

Também na análise financeira foram tidos em conta certos pressupostos. Visto que o trabalho teve como objetivo principal a comparação entre dois sistemas solares, térmico e termodinâmico e que na perspetiva financeira os sistemas estão igualmente dependentes dos mesmos fatores externos, considerou-se que a variação do custo do combustível do sistema de apoio, termoacumulador elétrico, e a inflação ao longo dos anos se manteria nula, evitando assim possíveis erros associados a uma má previsão económica ao longo dos 25 anos dos projetos a implementar. Assim sendo, do ponto de vista financeiro, os únicos fatores tidos em consideração foram os custos de investimento e de manutenção, e os ganhos económicos, na redução do consumo de eletricidade, com a implantação do projeto ao longo dos anos. Desta forma conseguiu-se obter o *payback*, fluxos de caixa e valor atualizado líquido (VAL) de cada sistema, e determinar a viabilidade do projeto.

## 4.2 SIMULAÇÃO DO SISTEMA SOLAR TÉRMICO

Relativamente ao sistema solar térmico admitiu-se um coletor padrão de acordo com a Portaria n.º 349-B/2013 (cenário 1) e um coletor da Solahart Industries (cenário 2). O coletor padrão pretende informar quais os requisitos mínimos exigidos para sistemas para aproveitamento de fontes de energia renovável pela legislação nacional.

Assumindo algumas considerações gerais para todos os cenários, incluindo os serviços de manutenção que devem ser feitos com uma periodicidade de 1 ano, com um custo estimado em de cerca de 75€ por cada ano/manutenção. Nos serviços de manutenção destacam-se a limpeza dos coletores, a afinação do caudal e pressão do circuito solar, verificação do vaso de expansão, da válvula de segurança, da concentração do fluido anticongelante, da estrutura e dos termóstatos.

Como sistema de armazenamento considerou-se, para todos os cenários do sistema solar térmico, um reservatório de 300 L sem permutador de calor e sem recurso a bomba. Foram consideradas perdas térmicas de 3% no coletor devido principalmente a sujidade acumulada no coletor e 5% no reservatório e tubagens inerentes ao sistema devido ao contacto térmico com temperaturas ambiente mais baixas. A eficiência do sistema de apoio ( $\eta_{\text{apoio}}$ ), quando se opta por um termoacumulador elétrico deve ser considerada de 0,95 [22].

#### 4.2.1 CENÁRIO 1 – SISTEMA SOLAR TÉRMICO PADRÃO

Este cenário pretende estabelecer a contribuição mínima de energia renovável necessária para o dimensionamento de sistemas para aproveitamento de fontes de energia renováveis, isto é, todos os sistemas necessitam de fornecer energia térmica (kWh) equivalente ou superior ao que o sistema solar térmico padrão fornece. De acordo com a Portaria n.º 349-B/2013, ao abrigo do disposto no Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação (REH), publicado pelo Decreto-Lei n.º 118/2013, um sistema solar térmico padrão deve ser constituído, tal como expresso na Tabela 4, por coletores orientados a Sul e com inclinação de 35º, ter uma área de abertura de 0,65 m<sup>2</sup> por ocupante (neste cenário com 4 habitantes tem-se um coletor de 2,6 m<sup>2</sup>), um rendimento ótico de 73 % e coeficientes de perdas térmicas  $a_1$  de 4,12 W/m<sup>2</sup>. K e  $a_2$  de 0,014 W/m<sup>2</sup>. K e um modificador de ângulo incidente ( $K_{\theta}$ ) de 50º de 0,91 [22], estes parâmetros são determinados através de ensaios padrão e fornecidos pelos fornecedores dos coletores, para auxiliar no calculo da eficiência do coletor ( $\eta$ ) recorrendo à equação:

$$\eta = Fr(\tau\alpha) - Fr(UL) \times \frac{\Delta T}{G_{solar}} \quad (5)$$

em que:

- $Fr(\tau\alpha)$  é o rendimento ótico, adimensional ou seja, é a eficiência que o coletor tem na captura da radiação solar.

- $F_r(UL)$ , também considerado como  $a_1$ , é o coeficiente de perdas térmicas, por convecção e condução, do coletor,  $W/m^2$ . Quanto menor o valor, melhor o coletor retém a energia térmica captada.
- $\alpha T_{Fr(UL)}$ , também considerado como  $a_2$ , é o coeficiente de Temperatura de  $F_r(UL)$ ,  $W/m^2 \cdot K$
- $\Delta T$ : diferença de temperatura entre o fluido no coletor e o ar ambiente
- $G_{solar}$  é a radiação solar incidente no coletor

TABELA 4 – CARACTERÍSTICAS COLETOR SOLAR PADRÃO

**Aquecedor solar de água**

Tipo	Vitrificado	
Fabricante	Padrão	
Modelo	Portaria n.º 349-B/2013	
Área bruta por coletor solar	m <sup>2</sup>	2,6
Área de Captação por coletor solar	m <sup>2</sup>	2,6
Coeficiente $F_r$ ( $\tau\alpha$ )		0,73
Coeficiente $F_r UL$	( $W/m^2$ ) / °C	4,12
Coeficiente de Temperatura de $F_r UL$	( $W/m^2$ ) / °C <sup>2</sup>	0,014
Número de coletores		1
Área do coletor solar	m <sup>2</sup>	2,6
Capacidade	kW	1,82
Perdas diversas	%	3,0%

Tendo em conta as características do coletor, e considerando que o consumo de AQS está de acordo com o perfil de carga L, do Retscreen obtiveram-se os resultados presentes na Tabela 5 para as simulações para as diferentes cidades consideradas, sendo a fração solar definida como a percentagem das necessidades energéticas para AQS produzidas a partir do sistema solar. Para o preenchimento da tabela 5 foi feita a simulação individual de cada mês e a simulação anual. Foi

possível confirmar que Faro, por ter temperatura e níveis de radiação maiores ao longo do ano, tem também um melhor aproveitamento do sistema solar térmico.

TABELA 5 - CALOR FORNECIDO E FRAÇÃO SOLAR, CENÁRIO 1

Mês	Pedido de calor (kWh)	Calor Fornecido (kWh)			Fração Solar (%)		
		Bragança	Coimbra	Faro	Bragança	Coimbra	Faro
Janeiro	361,3	79,3	105,4	143,0	21,9	29,2	39,6
Fevereiro	326,3	111,0	129,1	146,2	34,0	39,6	44,8
Março	361,3	170,1	192,3	204,6	47,1	53,2	56,6
Abril	349,7	187,5	201,4	217,9	53,6	57,6	62,3
Maió	361,3	217,3	211,9	244,9	60,1	58,6	67,8
Junho	349,7	231,9	211,4	242,4	66,3	60,5	69,3
Julho	361,3	260,7	236,8	261,5	72,1	65,5	72,4
Agosto	361,3	251,0	236,3	256,4	69,5	65,4	71,0
Setembro	349,7	209,2	196,8	226,9	59,8	56,3	64,9
Outubro	361,3	147,7	177,0	197,3	40,9	49,0	54,6
Novembro	349,7	98,6	136,9	150,6	28,2	39,1	43,1
Dezembro	361,3	59,7	139,5	131,0	16,5	38,6	36,3
<b>Ano</b>	<b>4254,1</b>	<b>2023,9</b>	<b>2174,6</b>	<b>2422,7</b>	<b>47,6</b>	<b>51,1</b>	<b>56,9</b>

As restantes necessidades energéticas são fornecidas pelo sistema de apoio, com uma eficiência ( $\eta$ ) de 0,95.

$$W_{\text{apoio}} = \frac{Q_{\text{total}} - Q_{\text{solar}}}{\eta_{\text{apoio}}} \quad (6)$$

### Análise Financeira

Foi assumido um investimento inicial para o sistema padrão de 2000 €, por ser um custo médio praticado em Portugal, tendo sido considerado o único investimento associado ao projeto (100 % do investimento), com gastos anuais de manutenção na ordem dos 75 € e tempo de vida útil de 25 anos. De forma a obter a análise financeira do projeto, Tabela 6, foi necessário considerar um cenário de comparação com o proposto aqui, considerado neste trabalho como o caso de

referência. Neste cenário de comparação é assumido que toda a energia necessária para AQS é fornecida por um termoacumulador elétrico com 95% de eficiência. Este termoacumulador consome energia elétrica fornecida pela rede ao custo de 0,1618 €/kWh (preço praticado a julho de 2016 no mercado liberalizado pela ENAT – Energias Renováveis). Assim sendo, os custos anuais associados ao termoacumulador são de 725 €. Já para o caso de haver um investimento no sistema solar térmico juntamente com um termoacumulador como sistema de apoio (caso proposto), o Retscreen ao calcular a fração solar, e saber os ganhos térmicos obtidos pelo sistema solar, permite saber quais os custos associados à fração do sistema de apoio, e calcula que é possível obter *payback* de 6 a 8 anos, dependendo da cidade em que é instalado o sistema. Isto porque o sistema solar térmico permite uma redução de custos anuais associados ao consumo de eletricidade entre 270 € (Bragança) a 338 € (Faro).

TABELA 6 - ANÁLISE FINANCEIRA, CENÁRIO 1

<b>Custos iniciais</b>				
		<b>Bragança</b>	<b>Coimbra</b>	<b>Faro</b>
<b>Sistema de Aquecimento</b>	<b>100 %</b>	<b>€</b>		2 000
<b>Total de custos de investimento</b>	<b>100 %</b>	<b>€</b>		2 000
<b>Pagamento anual de custos e empréstimos</b>				
<b>Manutenção</b>		<b>€</b>		75
<b>Custo combustível - caso proposto</b>		<b>€</b>	380	354
<b>Total de custos anuais</b>		<b>€</b>	455	429
				387
<b>Economia anual e receita</b>				
<b>Custo combustível - caso de referência</b>		<b>€</b>		725
<b>Total de economia e receita anual</b>		<b>€</b>		725
<b>Viabilidade Financeira</b>				
<b>Payback</b>		<b>ano</b>	7,42	6,77
<b>Fluxo de caixa</b>		<b>€</b>	270	295
<b>Taxa Interna de Retorno (TIR)</b>		<b>%</b>	12,83	14,24
<b>Valor Atualizado Líquido (VAL)</b>		<b>€</b>	4 743	5384
				6441



Da avaliação financeira, lembrando que foi assumido como nula a variação do custo da eletricidade e a inflação ao longo do tempo de vida do sistema solar, concluiu-se que o *payback* do investimento é razoável comparativamente a outros tipos de sistemas de AQS convencionais. O Valor Atualizado Líquido (VAL – soma de todos os fluxos de caixa) é bastante bom, obtendo lucros bastante acima de 200 % do investimento inicial ao fim de 25 anos, como exemplo demonstrativo temos a Figura 14 para o cenário proposto para Coimbra, e obteve-se Taxa Interna de Retorno (TIR) entre 12 % e 17 %, um valor que dificilmente é oferecido pelos Bancos para o caso de, por exemplo, optar por pôr o dinheiro a render no banco num mesmo período de tempo.

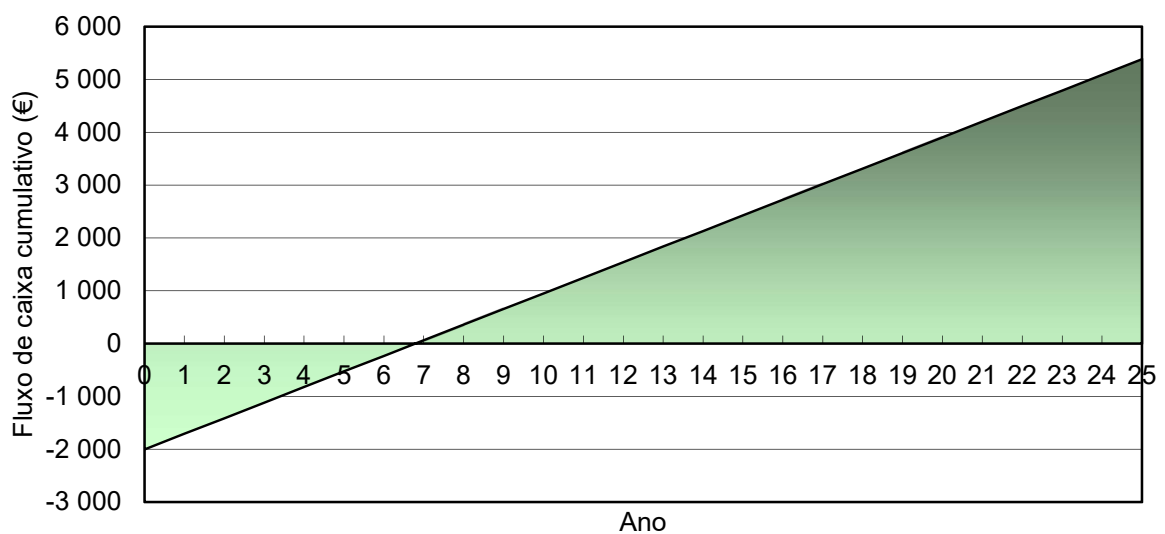


FIGURA 14 - FLUXO DE CAIXA CUMULATIVO (€), CENÁRIO 1 PARA COIMBRA

#### 4.2.2 CENÁRIO 2 – SISTEMA SOLAR TÉRMICO *SOLAHART INDUSTRIES*

Este cenário é baseado num coletor presente no mercado com características ligeiramente melhores que o coletor padrão do cenário 1, com circulação natural (termossifão). É em relação a este sistema que será, mais à frente, comparado o sistema solar termodinâmico. O coletor, que se encontra na base de dados do software Retscreen, tendo um painel do tipo “vitrificado” da *Solahart Industries* – modelo J tem uma área de captação de 1,87 m<sup>2</sup> por coletor, 77 % de eficiência e perdas térmicas (a1) na ordem dos 8,36 W/(m<sup>2</sup>.°C).

TABELA 7 - CARACTERÍSTICAS COLETOR SOLAHART J

**Aquecedor solar de água**

Tipo	Vitrificado		
Fabricante	Solahart Industries		
Modelo	Solahart J		
Área bruta por coletor solar	m <sup>2</sup>	1,98	
Área de Captação por coletor solar	m <sup>2</sup>	1,87	
Coefficiente Fr (tau alpha)		0,77	
Coefficiente Fr UL	(W/m <sup>2</sup> ) / °C	8,36	
Coefficiente de Temperatura de Fr UL	(W/m <sup>2</sup> ) / °C <sup>2</sup>	0,000	
Número de coletores		2	2
Área do coletor solar	m <sup>2</sup>	3,97	
Capacidade	kW	2,61	
Perdas diversas	%	3,0%	

Obteve-se, a partir do *Retscreen*, o calor fornecido pelo sistema e a fração solar comparativamente às necessidades energéticas do projeto. Por ter sido considerado um sistema com circulação natural, com termossifão, não foi considerado nenhum consumo associado a bombas de circulação.

TABELA 8 - CALOR FORNECIDO E FRAÇÃO SOLAR, CENÁRIO 2

Mês	Pedido de calor (kWh)	Calor Fornecido (kWh)			Fração Solar (%)		
		Bragança	Coimbra	Faro	Bragança	Coimbra	Faro
Janeiro	361,3	74,0	113,8	165,6	20,5	31,5	45,8
Fevereiro	326,3	121,4	148,8	172,1	37,2	45,6	52,7
Março	361,3	196,9	228,2	244,2	54,5	63,2	67,6
Abril	349,7	220,1	240,6	260,9	63,0	68,8	74,6
Maiο	361,3	258,7	255,7	294,7	71,6	70,8	81,6
Junho	349,7	279,7	258,5	295,0	80,0	73,9	84,4
Julho	361,3	316,5	291,1	320,5	87,6	80,6	88,7
Agosto	361,3	305,6	290,5	315,0	84,6	80,4	87,2
Setembro	349,7	254,5	242,6	279,1	72,8	69,4	79,8
Outubro	361,3	172,9	214,4	241,0	47,8	59,3	66,7
Novembro	349,7	104,2	159,3	179,0	29,8	45,6	51,2
Dezembro	361,3	46,6	159,9	150,6	12,9	44,3	41,7
<b>Ano</b>	<b>4254,1</b>	<b>2351,2</b>	<b>2603,5</b>	<b>2917,7</b>	<b>55,3</b>	<b>61,2</b>	<b>68,6</b>

Da tabela 8 verifica-se que existem grandes diferenças de produção de AQS através do sistema solar térmico consoante a região escolhida para a implementação do projeto, pois a fração solar do local com menor calor produzido, Bragança, e o local com maior calor produzido, Faro, diferem em mais de 550 kWh. É, também, perceptível que a diferença de produção de AQS entre o verão e o inverno é bastante significativa, independentemente do local escolhido, dentro de Portugal continental, para a implementação do projeto, pois está bastante dependente da radiação solar do local.

#### Simulação Sazonal

Para um melhor entendimento sobre o desempenho energético do coletor ao longo do ano simulou-se a quantidade de calor fornecida em períodos de aquecimento, arrefecimento e meia estação. Desta forma é possível obter uma melhor comparação entre os sistemas solares térmicos e termodinâmicos.

Para o **período de aquecimento** foram considerados os 5 meses mais frios do ano, entre 1 de outubro e 28 de fevereiro, um período crítico para sistemas baseados no aproveitamento de energia solar, pois é nesta altura do ano que há menor radiação incidente na superfície terrestre, e consequentemente, nos coletores solares, reduzindo a fração que um sistema solar consegue fornecer. Durante o período de aquecimento previu-se que fossem necessários 1760 kWh para AQS, através da Equação 2. Pela análise do *Retscreen* obteve-se fração solar de **31%** para Bragança, **46%** para Coimbra e **52%** para Faro, e 544 kWh, 812 kWh e 914 kWh respetivamente, tal como representado na Tabela 9. Esta diferença de fração solar entre as três cidades deve-se á latitude de cada uma, estando sujeitos a maiores níveis de radiação quanto mais próximas do equador estiverem. Torna-se claro que é bastante mais vantajoso instalar este tipo de sistemas em locais com maiores níveis de radiação.

No **período de meia estação** pretendeu-se estimar a capacidade de cada sistema solar para os meses de temperatura amena, que pretendem representar estação da Primavera e do Outono, tendo sido considerados os meses mais próximos dos equinócios, fevereiro, março, abril, setembro e outubro. Foram considerados igualmente 5 meses de forma a permitir uma melhor comparação entre os diferentes períodos. Para este período previu-se a necessidade energética para AQS de 1748 kWh, variando das necessidades para o período de aquecimento apenas por ter um menor número de dias, neste caso menos 1 dia na soma dos dias dos 5 meses em questão. De acordo com a simulação em *Retscreen* obtiveram-se valores de fração solar superiores ao período anterior considerado, Tabela 9, como seria de esperar, continuando a verificar-se menor fração solar em Bragança, apesar de a diferença para Coimbra e Faro se ter reduzido. São valores bastante semelhantes aos obtidos para a simulação anual, o que indica que a menor fração solar de AQS no período de aquecimento é compensada de igual forma por uma maior fração solar no período de arrefecimento.

Por fim, para o **período de arrefecimento** foram considerados os 5 meses mais próximos do solstício de verão, ou seja, desde 1 de maio até 30 de setembro. Este é o período do ano em que se registam maiores temperaturas e há mais radiação incidente, sendo por isso normal que os valores de fração solar sejam superiores do resto do ano, tal como demonstrado pela simulação *Retscreen*. É neste período que há maiores ganhos energéticos e, consequentemente, maior poupança em relação ao caso de referência (sistema termoacumulador admitido para este trabalho). Verifica-se que há maiores ganhos energéticos em Bragança do que em Coimbra, isto porque durante estes

meses se regista maior radiação solar para Bragança apesar de ter temperatura do ar ligeiramente mais baixa.

**TABELA 9 – RESULTADOS DO CALOR FORNECIDO POR CADA PERÍODO DO ANO, SOLAHART**

Período	Pedido de calor (kWh)	Calor Fornecido (kWh)			Fração Solar (%)		
		Bragança	Coimbra	Faro	Bragança	Coimbra	Faro
<b>Aquecimento</b>	1759,9	544,5	812,0	913,7	30,9	46,0	51,8
<b>Meia Estação</b>	1748,3	968,1	1077,3	1200,1	55,2	61,5	68,5
<b>Arrefecimento</b>	1783,2	1418,4	1341,6	1507,9	79,4	75,1	84,4

#### Análise Financeira - SOLAHART

Para o cálculo financeiro considerou-se um investimento de 2862 € no sistema que incluem 2 painéis e um reservatório de 300 L, preço praticado pela ENAT – Energia Naturais, assumindo custos de instalação, desenvolvimento de projeto e outros custos associados já incluídos. Como foi considerado um sistema de circulação natural não existem despesas associadas a bombas de circulação.

Foi considerado, tal como no cenário 1, o fluxo de caixa do sistema proposto em relação a um sistema de referência composto apenas por um termoacumulador elétrico, tendo sido estimado que os gastos anuais do sistema com termoacumulador seriam na ordem dos 725 €, e que o sistema proposto, de acordo com a fração solar estimada acima, o termoacumulador passaria a necessitar entre 300 € a 400 €, dependendo da cidade, Tabela 10. Desta forma foi possível verificar que o *payback* é acrescido de cerca de 1 ano em relação ao cenário 1, isto porque apesar dos coletores, neste cenário, terem melhores características e o fluxo de caixa ser maior, o investimento inicial é superior em 862 €.

TABELA 10 - ANÁLISE FINANCEIRA, CENÁRIO 2

<b>Custos iniciais</b>					
			<b>Bragança</b>	<b>Coimbra</b>	<b>Faro</b>
<b>Sistema de Aquecimento</b>	<b>100 %</b>	<b>€</b>		2 862	
<b>Total de custos de investimento</b>	<b>100 %</b>	<b>€</b>		2 862	
<b>Pagamento anual de custos e empréstimos</b>					
<b>Manutenção</b>		<b>€</b>		75	
<b>Custo combustível - caso proposto</b>		<b>€</b>	323	280	227
<b>Total de custos anuais</b>		<b>€</b>	398	355	302
<b>Economia anual e receita</b>					
<b>Custo combustível - caso de referência</b>		<b>€</b>		725	
<b>Total de economia e receita anual</b>		<b>€</b>		725	
<b>Viabilidade Financeira</b>					
<b>Payback</b>		<b>ano</b>	8,78	7,75	6,77
<b>Fluxo de caixa</b>		<b>€</b>	326	369	423
<b>Taxa Interna de Retorno (TIR)</b>		<b>%</b>	10,4	12,17	14,24
<b>Valor Atualizado Líquido (VAL)</b>		<b>€</b>	5 289	6 365	7 704

Todas as variáveis indicam que este é um cenário viável; apesar de o *payback* ser algo moroso, o retorno financeiro até ao final do projeto é bastante satisfatório, maior ainda que no cenário 1 e, de acordo com a Figura 15, obtém-se um VAL bastante superior ao investimento inicial, sendo que se obtém poupança de cerca de 65 % do período de projeto, para o caso de pior rendimento, Bragança.

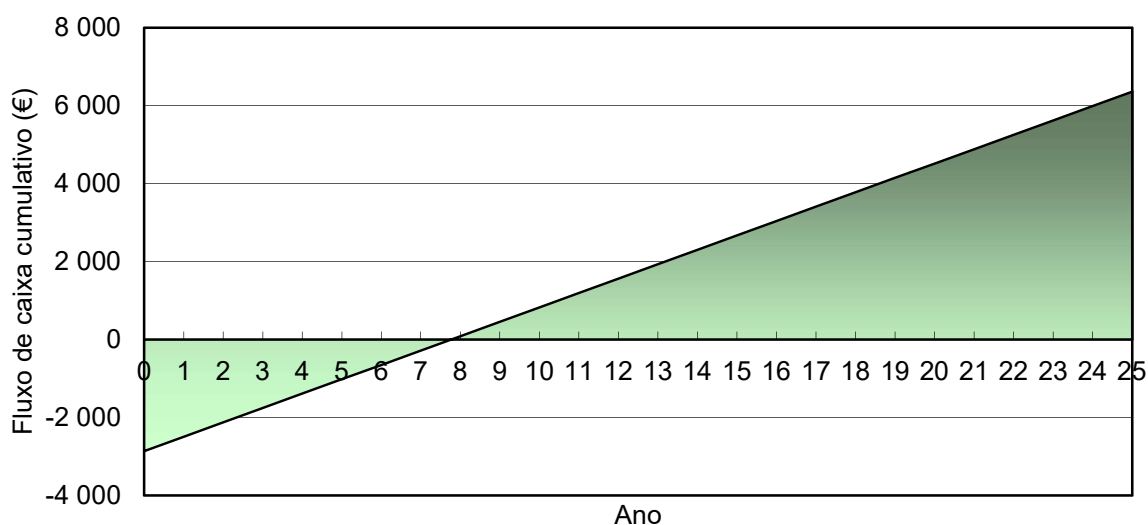


FIGURA 15 - FLUXO DE CAIXA CUMULATIVO (€), CENÁRIO 2 PARA COIMBRA

Tendo obtido valores para os possíveis ganhos energéticos e financeiros da implementação de um sistema solar térmico para as cidades de Bragança, Coimbra e Faro, é altura de fazer simulação em condições idênticas para os sistemas solares termodinâmicos. Para isso foi necessário recorrer a outro *software*, o EcoREN.

#### 4.3 SOFTWARE ECOREN - TERMODINÂMICO

Para o cálculo de sistemas solares termodinâmicos recorreu-se ao *software* EcoREN, baseado no método BIN modificado, método de cálculo do SPF, *Seasonal Performance Factor* para bombas de calor, baseado na temperatura do ar ambiente junto ao coletor, disponibilizado pelo LNEG (Laboratório Nacional de Energia e Geologia) e baseado no artigo “*New test methodologies to analyse direct expansion solar assisted heat pumps for domestic hot water*” de Jorge Falcão e Maria João Carvalho [23]. Ele fornece o Fator de Desempenho Anual (SPF - *Season Performance Factor*), equivalente ao  $COP_{dia}$  (Q/W), obtido através da Equação 7.

$$SPF_{anual} = \frac{\sum_{j=1}^n h_j E}{\sum_{j=1}^n \frac{h_j E}{SPF_j}} \quad (7)$$

Sendo  $E$  a energia diária total das extracções de água efetuadas, o somatório resulta em 11,655 kWh para o ciclo L (o considerado neste trabalho), em conformidade com o Quadro 1 do Anexo III do Regulamento (UE) n.º 814/2013 disponível no anexo A deste trabalho, e  $h$  a frequência média diária de temperatura, isto é, o número médio de vezes, por dia, a que o ar ambiente se encontra a uma certa temperatura, obtida através de dados experimentais.  $SPF_j$  (Fator de desempenho diário) está dependente da temperatura média diária do ar, através do cálculo, baseado em dados experimentais, da Equação 8.

$$SPF_j = 0,051 T_{ar} + 1.1091 \quad (8)$$

Com o *software* obtém-se  $Q_{usable}$ , energia anual fornecida pela bomba de calor (compressor mais energia térmica extraída do ar ambiente), calculado pelo produto da capacidade instalada (W) e as horas de funcionamento anuais da bomba, e  $E_{REN}$  a energia proveniente de energia renovável, obtida a partir da Equação 9. Os cálculos estão dependentes de dados climáticos do local como a temperatura ambiente, a radiação solar e humidade relativa obtidos através de outro *software* também disponibilizado pelo LNEG, o Climas SCE, e também do caudal de AQS necessário consumir. Este último ponto, consumo de AQS, torna o *software* algo limitado pois apenas admite um consumo constante definido pelo Quadro 1 do Anexo III do Regulamento (EU) n.º 814/2013.

$$E_{REN} = Q_{usable} \left( 1 - \frac{1}{SPF_{anual}} \right) \quad (9)$$

O consumo de energia eléctrica do compressor ( $Q_c$ ) pode ser calculado da seguinte forma:

$$Q_c = \frac{Q_{usable}}{SPF_{anual}} \quad (10)$$





**FIGURA 16 - SOFTWARE ECOREN**

Este *software* baseia-se nas considerações recomendadas pela Norma EN 16147:2011, que estipulam as características da carga de temperatura água da rede a 10 °C, temperatura AQS de 55 °C e caudal de água quente entre 3 a 10 L/min, de acordo com o Quadro 1 do Anexo III do Regulamento (EU) n.º 814/2013.

O coletor solar deverá ter uma inclinação recomendada de 35 °, podendo-se optar por inclinações entre 10 ° a 85 °, dependendo do período em que se pretenda dar maior uso ao sistema, e azimute preferencial de 0° (virado a Sul). O *software* está parametrizado especificamente para modelos ECOTERMO 200, 250 e 300 da fabricante ENERGIE, com superfície de coletor de 1,6 m<sup>2</sup>, eficiência ótica do coletor termodinâmico de 80% e potência térmica entre 1690 a 2900 W. Os sistemas estão capacitados com um reservatório de armazenamento de AQS de 200, 250 ou 300 litros, consoante o modelo selecionado, com coeficiente de condensação do calor no interior do reservatório de 70 W/°C e coeficiente de perdas térmicas do reservatório em função da temperatura ambiente no local de instalação do reservatório ( $T_{ar,int}$ ),  $24.564 - 0,386 T_{ar,int}$  (kJ/hr.m<sup>2</sup>.K) [23], O *software* está modelado para  $T_{ar,int}$  recomendado de 20 °C e coeficiente de perdas térmicas do reservatório de 16,844 kJ/hr.m<sup>2</sup>.K. O compressor tem uma potência nominal entre os 390 e os 550 W, com perdas térmicas de 12 W/°C [24]. O sistema primário opera com o fluido refrigerante R 134a, e o sistema de aquecimento de apoio é um termoacumulador elétrico, com uma resistência elétrica de 1000 W e eficiência de 0.95.

Segundo o Anexo VII do Decreto-Lei n.º 141/2010 de 31 de dezembro, alterado pelo Decreto-Lei n.º 39/2013 de 18 de março, de acordo com a Diretiva 2009/28/CE de 23 de abril, apenas as bombas de calor com SPF superior a  $(1,15 \cdot 1/\eta)$  são considerados como equipamentos que captam energia renovável, estando definido pela União Europeia que o rendimento do sistema ( $\eta$ ) é de 45,5% [25], ou seja, as bombas de calor têm de ter SPF mínimo de 2,5.

#### 4.3.1 CENÁRIO 3 – SISTEMA SOLAR TERMODINÂMICO – ENERGIE Eco 200

Neste cenário foi considerada a utilização de um painel solar termodinâmico da ENERGIE, modelo ECO 200, inox constituído por um único painel de 1,6 m<sup>2</sup> e um reservatório de 200 L.

TABELA 11 – RESULTADOS DE SIMULAÇÃO ECOREN

Mês	Q <sub>usable</sub> (kWh)	SPF			E <sub>ren</sub> (kWh)			Q <sub>compressor</sub> (kWh)		
		Bragança	Cmb	Faro	Bragança	Cmb	Faro	Bragança	Cmb	Faro
Jan	361,3	2,4	2,6	2,7	211,4	221,3	225,9	88,1	85,1	83,7
Fev	326,3	2,6	2,7	2,8	200,5	204,5	208,2	77,1	75,7	74,4
Mar	361,3	2,7	2,8	2,9	228,3	231,9	235,7	84,6	82,8	81,3
Abr	349,7	2,8	2,9	3,0	224,8	227,2	231,5	80,3	78,3	77,2
Mai	361,3	3,0	2,9	3,1	241,6	238,6	243,3	80,5	82,3	78,5
Jun	349,7	3,2	3,0	3,1	240,1	234,2	238,6	75,0	78,1	77,0
Jul	361,3	3,4	3,2	3,4	253,7	246,9	253,5	74,6	77,2	74,6
Ago	361,3	3,3	3,1	3,3	250,7	243,0	252,4	76,0	78,4	76,5
Set	349,7	3,2	3,0	3,2	239,0	232,7	241,6	74,7	77,6	75,5
Out	361,3	2,9	2,9	3,0	235,8	235,8	240,3	81,3	81,3	80,1
Nov	349,7	2,6	2,7	2,9	216,5	221,3	227,0	83,3	82,0	78,3
Dez	361,3	2,5	2,6	2,7	218,0	223,8	228,4	87,2	86,1	84,6
<b>Ano</b>	<b>4254,2</b>	<b>2,8</b>	<b>2,8</b>	<b>3,0</b>	<b>2760,4</b>	<b>2761,2</b>	<b>2826,4</b>	<b>962,7</b>	<b>964,8</b>	<b>941,4</b>

É possível obter SPF superiores a 2,5 em todas as localidades e durante todo o ano, o que, de acordo com a Diretiva 2009/28/CE, de 23 de abril, faz com que este sistema solar termodinâmico seja considerado como sistema captador de energia renovável.

Para o sistema solar termodinâmico não se verifica uma variação tão significativa como no sistema solar térmico na produção de AQS via energia renovável entre as três diferentes cidades consideradas, mantendo-se relativamente constante ao longo do ano. De notar que a energia térmica anual fornecida pelo sistema solar termodinâmico em Bragança é superior à de em Coimbra, isto porque, a radiação incidente em Bragança durante os meses de maio até setembro é superior, compensando a menor eficiência do sistema durante os restantes meses.

Conseguem-se obter, para as três cidades, cerca de 65 % das necessidades energéticas para AQS anuais, mas de apenas 53 %, de acordo com a Equação 11, quando se incluem os gastos energéticos associados ao compressor.

$$FS_{\text{termodinâmico}} = \frac{E_{\text{ren}}}{Q_{\text{usable}} + Q_c} \quad (11)$$

### Simulação Sazonal

Foram considerados os mesmos períodos de funcionamento que no cenário 2. Neste caso os resultados da Tabela 12 indicam que a produção total de AQS para cada período, e para cada cidade, se mantêm sensivelmente iguais, isto é, a produção de AQS é idêntica independentemente da cidade selecionada para o projeto, e também a variação de produção de AQS entre os três períodos simulados é menos significativa que o cenário proposto para o sistema solar térmico. Foi considerada a subtração dos gastos energéticos do sistema com o compressor a toda a energia térmica fornecida, dando uma perspetiva mais prática do funcionamento e poupança energética do sistema.

Durante o **período de aquecimento**, desde outubro até fevereiro, conseguem-se ganhos térmicos de cerca de 1100 kWh e às necessidades térmicas de 1700 kWh é acrescido 400 kWh de energia elétrica necessária ao funcionamento do compressor, ou seja, o sistema fornece cerca de 51% da energia necessária.

O **período de meia estação** tem necessidades energéticas de AQS semelhantes aos outros períodos, e verifica-se um ligeiro decréscimo da energia necessária por parte do compressor e um aumento da quantidade de energia renovável fornecida em relação ao período de aquecimento, conseguindo obter uma média de 53 % de toda a energia necessária para AQS e compressor.

No **período de arrefecimento** verifica-se que o sistema consegue fornecer cerca de 56 % de toda a energia necessária. Neste período há um ligeiro aumento de rentabilidade do sistema. É interessante reparar que em Bragança é possível obter mais energia térmica do que em Coimbra, isto porque, de acordo com a Tabela dos dados meteorológicos, há mais radiação em Bragança durante este período, apesar de a temperatura do ar ser menor.

**TABELA 12 - RESULTADOS DO CALOR FORNECIDO POR CADA PERÍODO DO ANO, ENERGIE**

Período	Q <sub>usable</sub> (kWh)	SPF			E <sub>ren</sub> (kWh)			Q <sub>c</sub> (kWh)		
		Brg	Cmb	Faro	Brg	Cmb	Faro	Brg	Cmb	Faro
<b>Aquecimento</b>	1759,9	2,6	2,7	2,8	1082,2	1106,7	1129,8	417,0	410,2	401,0
<b>Meia Estação</b>	1748,3	2,8	2,9	3,0	1128,4	1132,1	1157,3	398,0	395,8	388,4
<b>Arrefeciment.</b>	1783,3	3,2	3,0	3,2	1225,1	1195,4	1229,4	380,8	393,5	382,0

#### Análise Financeira

Para as três diferentes cidades os ganhos financeiros, tal como descritos na Tabela 13, são bastante idênticos. Têm investimento inicial de 1960 €, valor praticado pela ENAT – Energias Naturais em junho de 2016, e considerando o preço de 0,1618 €/kWh [21], obtém-se uma média de custos anuais de 480 €, provenientes de custos de cerca de 155 € associados ao consumo do compressor, 0,1618 €/kWh a multiplicar pelos valores obtidos a partir da Equação 9 e disponíveis na tabela 11 relativos ao consumo de energia elétrica do compressor (Q<sub>c</sub>), juntamente com os custos relativos a energia elétrica necessária ao termoacumulador, que serve como sistema de apoio, de 250 € de média entre as 3 cidades consideradas, calculados através da Equação 2, tendo em conta a quantidade de energia fornecida pela fração solar do sistema em relação à quantidade de energia anual necessária, 4254,2 kWh. São assumidos custos de manutenção de 75 €, idênticos ao sistema solar térmico.

No caso do sistema de referência – 100 % energia fornecida por termoacumulador elétrico – o consumo anual resulta em gastos de 725 €, assim sendo é possível com o sistema solar termodinâmico a poupança anual média de 245 €. Valores consideravelmente mais baixo que os do cenário 2, mas que devido ao investimento inicial ser menor é possível ter um *payback* ao fim de cerca de 8 anos. Em relação à TIR obtêm-se valores bastante bons tal como o VAL que ultrapassa os 200 % do investimento inicial.

TABELA 13 - ANÁLISE FINANCEIRA, CENÁRIO 3

<b>Custos iniciais</b>				
		<b>Bragança</b>	<b>Coimbra</b>	<b>Faro</b>
<b>Sistema de Aquecimento</b>	<b>100 %</b>	<b>€</b>	<b>1 960</b>	
<b>Total de custos de investimento</b>	<b>100 %</b>	<b>€</b>	<b>1 960</b>	
<b>Pagamento anual de custos e empréstimos</b>				
<b>Manutenção</b>		<b>€</b>	<b>75</b>	
<b>Custos associados ao compressor - caso proposto</b>		<b>€</b>	<b>156</b>	<b>152</b>
<b>Custo combustível - caso proposto</b>		<b>€</b>	<b>254</b>	<b>243</b>
<b>Total de custos anuais</b>		<b>€</b>	<b>485</b>	<b>471</b>
<b>Economia anual e receita</b>				
<b>Custo combustível - caso de referência</b>		<b>€</b>	<b>725</b>	
<b>Total de economia e receita anual</b>		<b>€</b>	<b>725</b>	
<b>Viabilidade Financeira</b>				
<b>Payback</b>	<b>ano</b>	<b>8,17</b>	<b>8,18</b>	<b>7,70</b>
<b>Fluxo de caixa</b>	<b>€</b>	<b>240</b>	<b>240</b>	<b>254</b>
<b>TIR</b>	<b>%</b>	<b>10,61%</b>	<b>11,40%</b>	<b>12,26%</b>
<b>Valor Atualizado Líquido (VAL)</b>	<b>€</b>	<b>4 036</b>	<b>4 030</b>	<b>4 402</b>

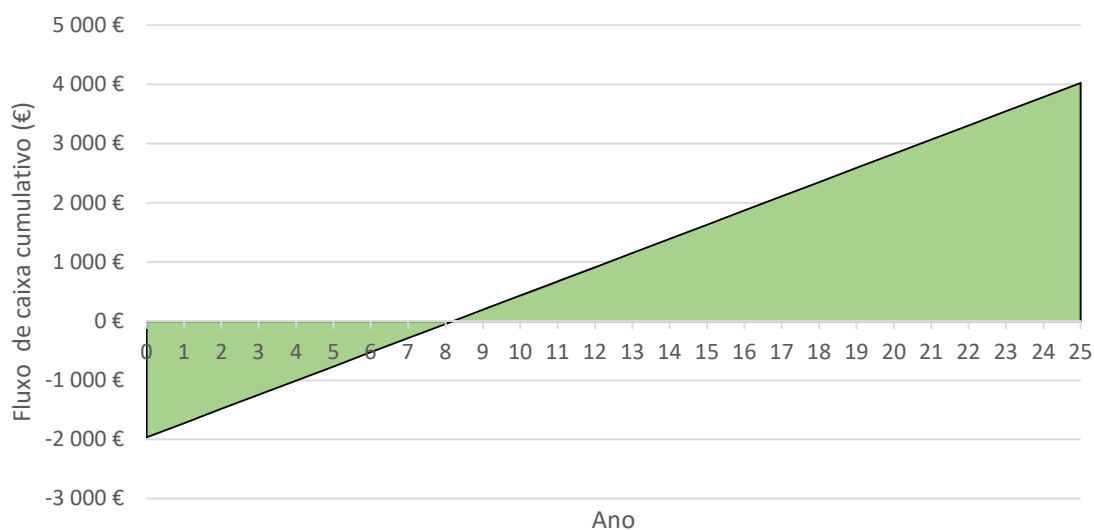


FIGURA 17 - FLUXO DE CAIXA CUMULATIVO (€), CENÁRIO 3 PARA COIMBRA

Resumidamente, em termos anuais, para as mesmas necessidades energéticas necessárias ao consumo de AQS do perfil L, 4254,2 kWh, os cenários considerados têm os ganhos representados na tabela 14. Estes e outros dados obtidos neste capítulo serão discutidos na próxima secção, com o objetivo de encontrar o melhor sistema solar para cada uma das situações.

TABELA 14 - RESUMO ENERGÉTICO

Cenário Anual	Fração Solar (%)			
	Bragança	Coimbra	Faro	
<b>1 - Padrão</b>	47,6	51,1	56,9	
<b>2 - SOLAHART</b>	55,3	61,2	68,6	
<b>3 - ENERGIE</b>	<b>s/compressor</b>	64,9	64,9	66,4
	<b>c/compressor</b>	52,9	52,9	54,4

Em termos financeiros, o cenário 1 não foi considerado pois a intenção dele é estabelecer os ganhos energéticos mínimos para um sistema ser considerado como um sistema para aproveitamento de fontes de energia renováveis. Também o investimento inicial foi um valor estimado, podendo os resultados financeiros não corresponder à realidade. Em relação aos cenários 2 e 3 verificam-se maiores ganhos no cenário 2 para o caso de Faro, e as diferenças de ganhos, tanto energéticos como financeiros, são mais visíveis nos sistemas solares térmicos.

TABELA 15 - RESUMO FINANCEIRO

Cenário Anual	Investimento (€)	Fluxo de caixa (€)			Payback (anos)		
		Bragança	Coimbra	Faro	Bragança	Coimbra	Faro
<b>1 - Padrão</b>	2 000	270	295	338	7,42	6,77	5,92
<b>2 - SOLAHART</b>	2 862	326	369	423	8,78	7,75	6,77
<b>3 - ENERGIE</b>	1 960	240	240	254	8,17	8,18	7,70





#### 4.4 COMPARAÇÃO DE RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

Em relação ao cenário 1, este serviu apenas como cenário de referência com as características mínimas definidas pela Portaria n.º 349-B/2013, de forma a estipular a produção (kWh) de energia renovável mínima necessária aos sistemas de aproveitamento de fontes de energia renováveis. Verifica-se que os ganhos térmicos presentes no cenário 2 e 3 são superiores aos do cenário 1, podendo afirmar que estes cenários cumprem os requisitos mínimos, ou seja, tem maior produção de energia térmica (kWh).

Os cenários 2 e 3 foram baseados nos painéis comercializados pela ENAT-Energias Naturais apesar de existirem, principalmente em relação ao sistema solar térmico, coletores com melhores características, algo que permite aumentar a fração solar do sistema e, conseqüentemente, aumentar as poupanças anuais e possivelmente reduzir o *payback* do sistema dependendo do investimento necessário.

Em termos anuais, para a mesma quantidade de energia térmica necessária, 4254 kWh, o sistema solar térmico com circulação natural consegue fornecer 2351 kWh, 2604 kWh e 2918 kWh em Bragança, Coimbra e Faro enquanto o sistema solar termodinâmico fornece 2760 kWh, 2761 kWh e 2826 kWh. Entendemos com estes valores que o sistema solar termodinâmico tem menores variações entre as diferentes cidades testadas e apresenta melhores ganhos térmicos para locais com menor radiação incidente. Mas o sistema solar termodinâmico tem a grande desvantagem de necessitar de um compressor para o seu funcionamento, este compressor tem gastos energéticos na ordem dos 950 kWh por ano, o equivalente a 35 % da energia térmica capturada, ou seja, na prática a energia útil produzida pelo sistema termodinâmico é de apenas 1798, 1796 e 1885 kWh para Bragança, Coimbra e Faro, valores anuais bastante abaixo da energia produzida por um painel solar térmico. Por outro lado, para os casos em que o consumo de água é constante ao longo do ano é mais viável o sistema solar termodinâmico em termos de dimensionamento, pois tem uma eficiência relativamente constante ao longo do ano, ao contrário do sistema solar térmico que pode variar, por exemplo no caso de Bragança do cenário 2 (Figura 21), entre os 13% em dezembro e os 88% em julho de toda a energia necessária a produção de AQS. Tendo em conta que é aconselhável que o sistema não ultrapasse os 100% da energia necessária, sinal que o sistema estaria sobredimensionado (maior investimento com igual contribuição energética, redução da viabilidade do projeto), e existem maiores riscos de degradação dos seus componentes, o sistema fica limitado quando há baixos níveis de radiação solar e temperatura do ar, que é o caso da estação de inverno em Portugal.

Os seguintes gráficos pretendem dar uma perspetiva geral da eficiência de cada sistema solar para as três cidades discutidas neste trabalho. Em relação ao sistema solar termodinâmico são apresentadas as frações solares admitindo apenas o calor gerado pelo sistema – Termodinâmico, e a fração solar que se verifica na prática ao estar a incluir a necessidade de compensar os gastos energéticos gerados pelo compressor do sistema, calculados pela Equação 9 e presentes na Tabela 11 – Termodinâmico -  $Q_c$ .

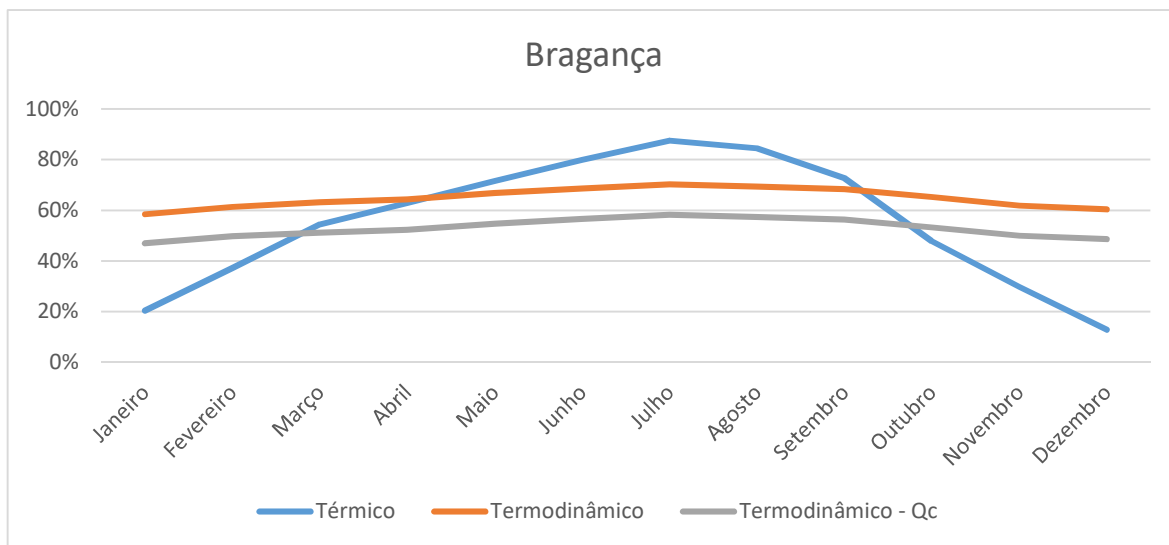


FIGURA 18 - FRAÇÃO SOLAR, BRAGANÇA

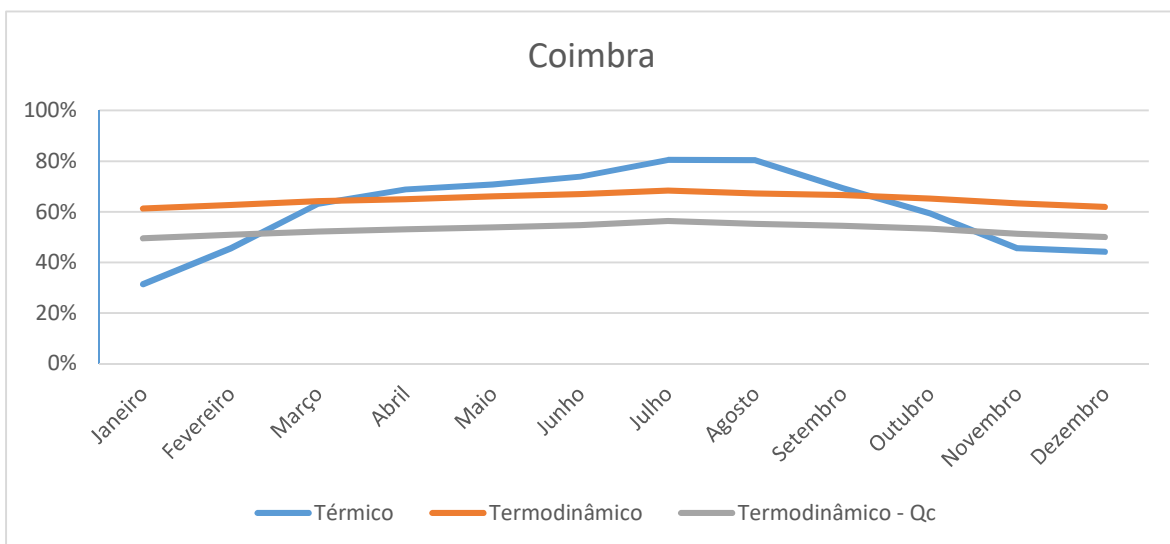


FIGURA 19 - FRAÇÃO SOLAR, COIMBRA

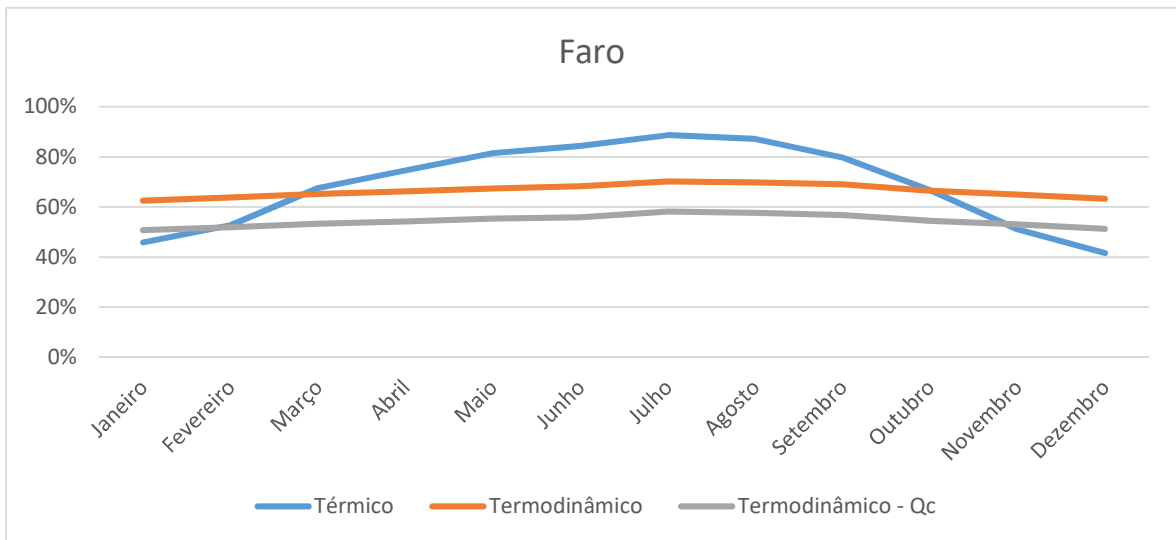


FIGURA 20 - FRAÇÃO SOLAR, FARO

### Simulação Sazonal

Para os casos de período de aquecimento, meia estação e arrefecimento pode-se confirmar o que as figuras acima indicam, estando apresentados em melhor detalhe pela Figura 24. Durante o período de aquecimento, que contabiliza os 5 meses mais frios do ano, obtêm-se melhores resultados com o sistema solar termodinâmico para os casos de Bragança e Coimbra, enquanto que para Faro se obtêm valores semelhantes para os dois sistemas. Já para os períodos de meia estação e de arrefecimento, devido à maior quantidade de radiação disponível, do qual o sistema solar térmico está mais dependente, a fração solar é maior para todos os casos no sistema solar térmico, atingindo valores máximos de 84 % durante o período de arrefecimento em Faro, enquanto o sistema solar termodinâmico apresenta valores muito abaixo, com máximos de 69 % no período de arrefecimento para Bragança e Faro.

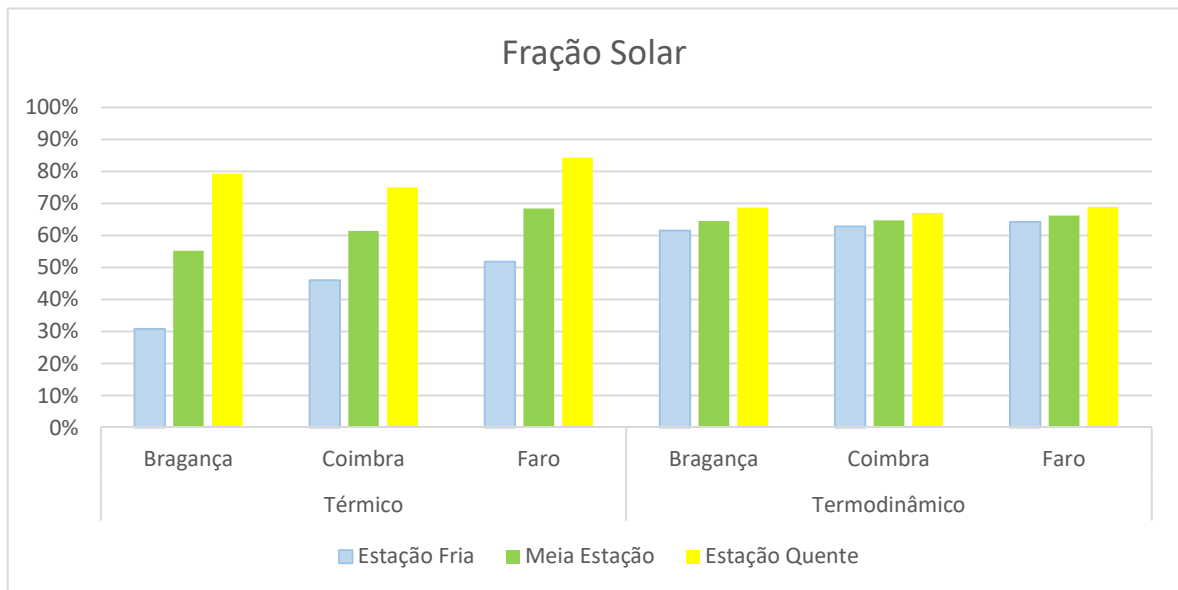


FIGURA 21 - RESUMO DAS SIMULAÇÕES SAZONAIS

### Análise Financeira

De acordo com a Tabela 13 e as Figuras 15 e 17 de fluxo de caixa cumulativos depreende-se que em termos de investimento inicial o sistema solar térmico é menos apelativo, pois é superior em quase 50%. Em relação ao *payback*, este difere consoante a cidade em questão; enquanto em Bragança é mais facilmente recuperado o investimento, ou seja, tem uma maior taxa interna de retorno (TIR), no caso de optar por sistemas solares termodinâmicos, já em Coimbra e Faro é preferível o sistema solar térmico, isto porque o fluxo de caixa anual é bastante superior no caso dos sistemas solares térmicos de tal forma que conseguem recuperar um maior investimento inicial num menor período de tempo, e daí os sistemas solares térmicos obterem um valor atualizado líquido bastante superior, sendo neste aspeto um projeto financeiramente mais viável.

TABELA 16 – RESUMO DA ANÁLISE FINANCEIRA

		Cenário 2			Cenário 3		
		Custos iniciais					
		Bragança	Coimbra	Faro	Bragança	Coimbra	Faro
<b>Total de custos de investimento</b>	€	2 862			1960		
		Viabilidade Financeira					
<b>Payback</b>	ano	8,78	7,75	6,77	8,17	8,18	7,70
<b>Fluxo de caixa</b>	€	326	369	423	240	240	254
<b>TIR</b>	%	10,4	12,17	14,24	10,61	11,40	12,26
<b>VAL</b>	€	5 289	6365	7704	4036	4030	4402

Comparativamente a sistema de AQS convencionais, estes têm, na sua grande maioria, *payback* bastante inferior, é o caso do esquentador a gás natural, por exemplo, que tem um custo inicial bastante inferior aos sistemas solares. A opção de instalar sistemas solares deve-se a uma maior poupança no consumo de combustível ao fim do mês, e grandes ganhos económicos até ao fim do tempo de vida do projeto, principalmente em casos em que o consumo de AQS é bastante significativo ou o combustível é dispendioso, caso do sistema de caldeira a gasóleo de aquecimento ou gás propano. É também mais viável para zonas remotas e países em vias de desenvolvimento, com acesso reduzido a combustível, em casos em que o utilizador tenha interesse na defesa do ambiente e redução de emissões de gases de efeito de estufa. No caso concreto de Portugal, a opção por sistemas de aproveitamento de fontes de energia renovável permite a valorização da habitação devido a uma melhor classificação energética.



## CAPÍTULO V: CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

De acordo com o Anexo VII do Decreto-Lei n.º 141/2010, de 31 de dezembro, alterado pelo Decreto-Lei n.º 39/2013, de 18 de março, de acordo com a Diretiva 2009/28/CE, de 23 de abril, o sistema solar termodinâmico com as características descritas neste trabalho é considerado como um sistema de produção de AQS de energia renovável, pois tem SPF superior a 2,5.

Tendo em conta os resultados obtidos pode-se dizer que, em relação ao sistema solar térmico, o fluxo de caixa e o valor atualizado líquido, o investimento torna-se mais viável, e que o sistema solar termodinâmico tem um investimento inicial mais reduzido, algo que pode influenciar no caso de famílias com baixos rendimentos ou com difícil acesso a financiamento externo.

O sistema solar térmico depara-se com um problema em relação aos sistemas convencionais, e mesmo em relação ao sistema solar termodinâmico: a eficiência do sistema varia bastante ao longo do ano, muito devido à radiação emitida pelo sol, algo que tem maior dimensão no cenário 2, para o caso de Bragança, em que a fração solar varia entre os 31% no período de aquecimento e 79% no período de arrefecimento. Neste caso, o dimensionamento do projeto para as condições de pico, que acontecem no inverno, com baixa radiação solar, tal como acontece nos sistemas convencionais, resulta num sobredimensionamento para a época de verão que levaria a um aumento considerável do investimento inicial, sem que haja grande aumento na poupança de energia e reduzindo consideravelmente a viabilidade do projeto. Isto é, para atingir 100% da fração solar no inverno seria necessário adquirir coletores solares extra que durante o verão não teriam qualquer utilidade. Desta forma, a melhor opção é dimensionar o sistema de forma a cobrir as necessidades energéticas médias anuais, o que implica a utilização de um sistema de apoio.

O sistema a escolher para a implementação de projeto deverá ter sempre em conta o período do ano em que se assume um maior consumo de AQS, ver Figura 24. Para casos extremos em que grande parte do consumo de AQS seja durante os meses mais frios do ano e com menores níveis de radiação, poderá ser mais viável optar pela instalação de sistemas solares termodinâmicos, pois estes apresentam melhores resultados durante esse período, por exemplo, no período de aquecimento, em Bragança, o sistema solar térmico fornece 544,5 kWh enquanto o sistema solar termodinâmico fornece 1082,2 kWh, mais de o dobro. Como proposta futura poderão ser analisados vários perfis anuais de consumo de AQS que representem o real consumo para cada tipo

de habitação e de localidade, de forma a complementar as conclusões deste trabalho. Propõe-se, igualmente, que os sistemas sejam dimensionados para a fração solar média anual ótima para cada sistema solar e para cada local, de forma a encontrar o equilíbrio entre os custos de investimento e consumo de AQS necessário, e o fluxo de caixa e a radiação disponível, resultando numa redução do *payback* do investimento sem causar o sobredimensionamento do sistema. Tendo em conta que os ganhos energéticos do sistema solar termodinâmico se mantêm relativamente constantes ao longo do ano, é espectável o dimensionamento do sistema solar termodinâmico para uma fração solar anual ligeiramente superior que o sistema solar térmico, sem provocar sobredimensionamento em nenhum período do ano. Também, de forma a reduzir custos associados ao sistema termodinâmico e ao sistema de apoio poderá ser instalado um painel solar fotovoltaico reduzindo as despesas associadas ao consumo de energia elétrica. Como forma de aumentar a eficiência do sistema poderá ser feita a recirculação da água nas canalizações, em circuito fechado, entre o depósito de água e o ponto de consumo, que reduz o desperdício da energia térmica retida nas tubagens e reduz o tempo de espera por água quente no ponto de consumo.



## REFERÊNCIAS

- [1] A. C. Marques and J. A. Fuinhas, “Are public policies towards renewables successful? Evidence from European countries,” *Renew. Energy*, vol. 44, pp. 109–118, 2012.
- [2] DGEG, “Energias Renováveis,” *Energia Solar*, 2016. [Online]. Available: <http://www.dgeg.pt/>. [Accessed: 10-Mar-2016].
- [3] D. B. F. Fernandes, “Tese em Sistema Híbrido Solar-Eólico,” Tese de Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores, 2010.
- [4] *Decreto-Lei n.º 118/2013 de 20 de Agosto do Ministério da Economia e do Emprego. Diário da República, 1.ª série - n.º 159*, vol. 159. 2013, pp. 4988–5005.
- [5] República Portuguesa, “Plano Nacional de Acção Para as Energias Renováveis ao Abrigo da Diretiva 2009/28/CE,” 2009.
- [6] *Resolução do Conselho de Ministros n.º 20/2013 da Presidência Do Conselho De Ministros. Diário da República, 1.ª série - n.º 70 - 10 de abril de 2013*, no. N.º 70. 2013, pp. 2022–2091.
- [7] *Portaria n.º 26/2011 dos Ministérios das Finanças e da Administração Pública, da Economia, da Inovação e do Desenvolvimento e do Ambiente e do Ordenamento do Território. Diário da República, 1.ª série - n.º 6 - 10 de janeiro de 2011*. 2011, pp. 165–168.
- [8] E. P. Lebeña and J. C. Costa, “CONVERSÃO TÉRMICA da ENERGIA SOLAR,” *Soc. Port. Energ. Sol.*, pp. 1–89, 2006.
- [9] Canmet Energy, “RETScreen® International Clean Energy Decision Support Centre,” *Clean Energy Project Analysis: RETScreen Engineering & Cases Textbook*, no. Solar Water Heating Project Analysis, 2004.
- [10] H. Wei, J. Liu, and B. Yang, “Cost-benefit comparison between Domestic Solar Water Heater (DSHW) and Building Integrated Photovoltaic (BIPV) systems for households in urban China,” *Appl. Energy*, vol. 126, pp. 47–55, 2014.
- [11] E. Kyriaki, V. Drosou, and A. M. Papadopoulos, “Solar Thermal Systems for Low Energy Hotel Buildings: State of The Art, Perspectives and Challenges,” *Energy Procedia*, vol. 78, pp. 1968–1973, 2015.

- [12] C. Philibert, "Barriers To Technology Diffusion: The Case Of Solar Thermal Technologies," *Other*, France, pp. 1–29, 2006.
- [13] INE, "Parque Habitacional em Portugal : Evolução na última década," pp. 1–10, 2012.
- [14] PER, "Portal das Energias Renováveis," *Tecnologias: Colectores Solares Térmicos*, 2016.  
[Online]. Available:  
[http://energiasrenovaveis.com/DetailheConceitos.asp?ID\\_conteudo=41&ID\\_area=8&ID\\_sub\\_area=26](http://energiasrenovaveis.com/DetailheConceitos.asp?ID_conteudo=41&ID_area=8&ID_sub_area=26). [Accessed: 22-Mar-2016].
- [15] *Energia Solar Térmica*. Portal Energia, 2004.
- [16] "O Coletor solar de Placa Plana (C.P.P.)."
- [17] J. A. Duffie and W. A. Beckman, *Solar engineering of thermal processes*, 4th ed. 2013.
- [18] F. C. Trevelin, "Estudo Comparativo Entre Métodos de Rastreamento Solar Aplicados a Sistemas Fotovoltaicos," Universidade de São Paulo, 2014.
- [19] J. C. P. Mayorga, "Colectores Solares Térmicos Frente A Paneles Solares Termodinâmicos. Aplicación Para ACS.," Universidad Carlos III de Madrid, 2012.
- [20] Quercus, "Ecocasa." [Online]. Available:  
[http://www.ecocasa.pt/energia\\_content.php?id=15#termico](http://www.ecocasa.pt/energia_content.php?id=15#termico). [Accessed: 04-Feb-2016].
- [21] ERSE, "Preços de Referência no Mercado Liberalizado de Energia Elétrica e Gás Natural em Portugal Continental," 2016.
- [22] *Portaria n.º 349-B/2013. Diário da República, 1.ª série - N.º 232 - 29 de novembro*, no. 18. 2013, pp. 18–29.
- [23] J. Facão and M. J. Carvalho, "New test methodologies to analyse direct expansion solar assisted heat pumps for domestic hot water," *Sol. Energy*, vol. 100, pp. 66–75, 2014.
- [24] ENERGIE, "Manual de Instruções - Sistema Solar Termodinâmico."
- [25] J. Falcão, M. Carvalho, and J. Mendes, "LNEG - Laboratório Nacional de Energia e Geologia." [Online]. Available: <http://www.lneg.pt/iedt/projectos/572/resumo>.
- [26] B. Norton, "Thermopedia," 2011. [Online]. Available:  
[http://www.thermopedia.com/content/1136/#SOLAR\\_ENERGY\\_FIG2](http://www.thermopedia.com/content/1136/#SOLAR_ENERGY_FIG2). [Accessed: 22-Apr-2016].

- [27] Água Quente Solar, “Que tipo de colectores / painéis existem no mercado,” *faq*. [Online]. Available: <http://www.aguaquentesolar.com/faq/questao.asp?id=5>. [Accessed: 29-May-2016].
- [28] C. W. Feltrin, “Síntese e Propriedades do ZnO: Correlação entre propriedades estruturais e atividade fotocatalítica,” Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Química, Porto Alegre, 2010.
- [29] ENAT, “Paineis Solares,” 2015. [Online]. Available: <http://pt.enat.pt/>. [Accessed: 04-Feb-2016].
- [30] H. A. F. P. Costa and (Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro), “Modelação Matemática de Sistemas Solares Térmicos,” p. 87, 2009.



## ANEXO

### ANEXO A – PERFIL L EXTRAÍDO DO QUADRO 1 DO ANEXO III DO REGULAMENTO (EU) N.º 814/2013

$Q_{tap}$  (kWh) – energia útil da água quente

$f$  (L/min) – caudal útil da água

$T_m$  (°C) – temperatura útil da água

$T_p$  (°C) – temperatura de pico

h	L			
	$Q_{tap}$	$f$	$T_m$	$T_p$
	kWh	l/min	°C	°C
07:00	<b>0,105</b>	3	25	
07:05	<b>1,4</b>	6	40	
07:15				
07:26				
07:30	<b>0,105</b>	3	25	
07:45	<b>0,105</b>	3	25	
08:01				
08:05	<b>3,605</b>	10	10	40
08:15				
08:25	<b>0,105</b>	3	25	
08:30	<b>0,105</b>	3	25	
08:45	<b>0,105</b>	3	25	

09:00	<b>0,105</b>	3	25	
09:30	<b>0,105</b>	3	25	
10:00				
10:30	<b>0,105</b>	3	10	40
11:00				
11:30	<b>0,105</b>	3	25	
11:45	<b>0,105</b>	3	25	
12:00				
12:30				
12:45	<b>0,315</b>	4	10	55
14:30	<b>0,105</b>	3	25	
15:00				
15:30	<b>0,105</b>	3	25	
16:00				
16:30	<b>0,105</b>	3	25	
17:00				
18:00	<b>0,105</b>	3	25	
18:15	<b>0,105</b>	3	40	
18:30	<b>0,105</b>	3	40	
19:00	<b>0,105</b>	3	25	
19:30				
20:00				
20:30	<b>0,735</b>	4	10	55
20:45				
20:46				

21:00	<b>3,605</b>	10	10	40
21:15				
21:30	<b>0,105</b>	3	25	
21:35				
21:45				
<b>Qref</b>	<b>11,655</b>			