

Universidade de Évora - Escola de Ciências e Tecnologia

Mestrado em Engenharia da Energia Solar

Dissertação

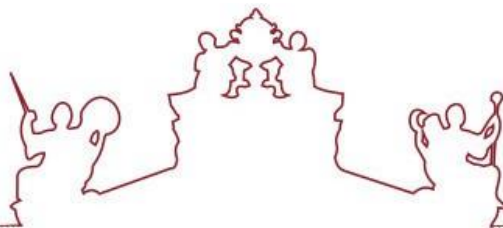
**Integração de Energia Solar na Produção de Biodiesel em
Portugal**

Maria Eliza Lima do Nascimento

Orientador(es) | José Eduardo Castanheiro
Isabel Maria Malico

Évora, 2024





Universidade de Évora - Escola de Ciências e Tecnologia

Mestrado em Engenharia da Energia Solar

Dissertação

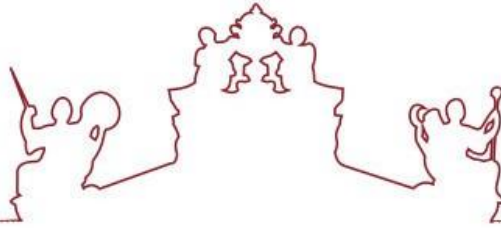
**Integração de Energia Solar na Produção de Biodiesel em
Portugal**

Maria Eliza Lima do Nascimento

Orientador(es) | José Eduardo Castanheiro
Isabel Maria Malico

Évora, 2024





A dissertação foi objeto de apreciação e discussão pública pelo seguinte júri nomeado pelo Diretor da Escola de Ciências e Tecnologia:

Presidente | Paulo Manuel Ferrão Canhoto (Universidade de Évora)

Vogais | José Eduardo Castanheiro (Universidade de Évora) (Orientador)
Paulo Mira Mourão (Universidade de Évora) (Arguente)

Resumo

O trabalho aborda a integração da energia solar térmica na produção de biodiesel, com o objetivo de melhorar a sua sustentabilidade. O *software* DWSIM foi utilizado para simular o processo de produção de biodiesel a partir de 1000 kg/h de óleo de colza (dias úteis, 9:00–18:00 h, 11 meses/ano). Desta simulação, se verifica a necessidade de uma potência nominal constante de 513 kW_t para satisfazer as necessidades de calor do *reboiler* da torre de destilação, correspondendo a 1542 MWh/ano a uma temperatura de 208°C. Se considerou que essa energia é parcialmente obtida recorrendo a coletores cilindro-parabólicos em dois cenários: apenas um coletor (cenário 1) e dois coletores em série (cenário 2). Se utilizou o *software* greenius para as simulações do sistema solar térmico com uma caldeira a gás natural localizado em Évora. No cenário 1, a fração solar anual é 37% enquanto no 2 é 55%. O aumento da percentagem das necessidades de calor de processo satisfeita a partir de energia solar do cenário 1 para o 2 é conseguido à custa de um maior desperdício de calor solar produzido (a razão de calor útil anual nos cenários 1 e 2 é, respetivamente, 77% e 59%). Quanto ao rendimento do campo solar, para o cenário 1, 34% da radiação solar é convertida em energia térmica útil, enquanto para o 2, apenas 25%. O período de retorno do sistema com um e dois coletores é, respetivamente, 4,1 e 5,1 anos, enquanto o custo nivelado de calor é, respetivamente, 0,09 €/kWh e 0,10 €/kWh (valores superiores ao da opção de utilizar apenas gás natural – 0,05 €/kWh). Pelo exposto, se conclui que a integração de um sistema solar térmico no processo de produção de biodiesel é interessante do ponto de vista energético, apresentando um custo superior ao do recurso a gás natural.

Palavras-chave: Energia renovável; Biocombustível; Biodiesel; Energia solar térmica; Calor de processo.

Abstract

“Integrating Solar Energy into Biodiesel Production in Portugal”

The work addresses the integration of solar thermal energy into biodiesel production with the aim of improving its sustainability. The DWSIM software was used to simulate the biodiesel production process from 1000 kg/h of rapeseed oil (working days, 9:00 h–18:00 h, 11 months/year). This simulation shows that a constant nominal power of 513 kW_t is needed to satisfy the heat requirements of the distillation column reboiler, corresponding to 1542 MWh/year at a temperature of 208 °C. This energy is partially obtained using cylindrical parabolic collectors in two scenarios: only one collector (scenario 1) and two collectors in series (scenario 2). The greenius software was used for the simulation of the solar thermal system located in Évora with natural gas as backup fuel. In scenario 1, the annual solar fraction is 37% while in scenario 2 it is 55%. The increase in the percentage of process heat requirements met by solar energy from scenario 1 to 2 is achieved at the cost of greater waste of the solar heat produced (the annual useful heat ratio in scenarios 1 and 2 is 77% and 59%, respectively). As for the efficiency of the solar field, for scenario 1, 34% of the solar radiation is converted into useful thermal energy, while for scenario 2, it drops to 25%. The payback period for the system with one and two collectors is 4.1 and 5.1 years respectively, while the levelized cost of heat is 0.09 €/kWh and 0.10 €/kWh respectively (higher than the option of using a natural gas boiler to produce the process heat–0.05 €/kWh). From the above, it can be concluded that integrating a solar thermal system into the biodiesel production process is interesting from an energy point of view, but with a higher cost than using natural gas.

Keywords: Renewable energy; Biofuel; Biodiesel; Solar thermal energy; Process heat.

Agradecimentos

Primeiramente agradeço a Deus que me sustentou até aqui agradeço a minha mãe (Betânia Maria de Lima) e minha tia Marta que me ajudaram sempre e aos meus amados familiares que estiveram comigo nessa jornada. Agradeço também aos meus professores Isabel Malico e José Castanheiro por serem excelentes professores e aprecio a vosso compromisso em fazer os alunos aprenderem, e admiro a vossa atitude em não desistir de nós alunos e principalmente de mim. Também agradeço a Viviane Romão, Gabriela Romão e Jorge Pereira por me influenciarem a nunca desistir dessa caminhada. Tudo tem o seu tempo determinado, e há tempo para todo o propósito debaixo do céu.

Índice

Lista de Figuras	v
Lista de Tabelas	vii
Nomenclatura	viii
Lista de Siglas e Acrónimos	x
1. Introdução	1
1.1 Enquadramento	1
1.2 A Indústria dos Biocombustíveis em Portugal.....	6
1.3 Objetivos do Trabalho.....	8
1.4 Organização da Dissertação.....	9
2. Energias Renováveis: Energia Solar Térmica e Biodiesel	11
2.1 Energia Solar Térmica	11
2.1.1 Energia Solar.....	11
2.1.2 Sistemas Solares Térmicos.....	14
2.1.3 Tecnologias de Coletores Solares de Concentração com Seguimento	18
2.1.4 Integração de Sistemas Solares Térmicos em Processos Industriais	24
2.1.5 Custos de Sistemas Solares Térmicos de Concentração	25
2.2 Biodiesel	26
2.2.1 Processo de Produção de Biodiesel.....	26
2.2.2 Mercado dos Biocombustíveis.....	31
2.2.3 Simuladores de Processos Químicos.....	34
3. Metodologia.....	37
3.1 Descrição do Caso de Estudo	37
3.2 Simulação do Processo de Produção de Biodiesel	38
3.3 Simulação do Sistema Solar Térmico	46
3.3.1 <i>Software</i> Greenius.....	46
3.4 Indicadores de Desempenho Técnico e Econômico do Projeto.....	58
3.4.1 Indicadores de Desempenho Técnico	58
3.4.2 Indicadores de Desempenho Econômico	60
4. Resultados	63
4.1 Análise da Viabilidade Técnico-económica do Sistema Proposto	63
4.2 Análise Detalhada das Simulações do Sistema Proposto	70
5. Conclusão e Perspetivas de Trabalhos Futuros.....	80
5.1 Conclusões	80
5.2 Perspetivas de Trabalhos Futuros	83
6. Referências	84

Lista de Figuras

Figura 1 Matriz energética mundial em 2021 (fonte: [5]).	2
Figura 2 Energia total obtida a partir das diferentes fontes energética no Mundo entre 2000 e 2021 (fonte:[5]).	3
Figura 3 Energia total obtida a partir das diferentes fontes energéticas na Europa entre 2000 e 2021 (fonte: [5]).	3
Figura 4 Energia total obtida a partir das diferentes fontes energéticas em Portugal entre 2000 e 2021 (fonte: [5]).	4
Figura 5 Matérias-primas utilizadas na produção de biocombustíveis e biogás em Portugal no terceiro semestre de 2023 [20].	7
Figura 6 Classificação de formas de aproveitamento da energia solar (adaptado de [27]).	12
Figura 7 Capacidade de energia solar térmica de concentração para a produção de eletricidade por país entre 2012 e 2022 [30].	13
Figura 8 Coletor solar plano [36].	17
Figura 9 Representação de coletor cilindro-parabólico e detalhe do receptor [32].	19
Figura 10 Imagem de um coletor linear de Fresnel [45].	21
Figura 11 Representação de coletor de disco parabólico [32].	23
Figura 12 Imagem de um sistema solar de torre [47].	24
Figura 13 Sistema SHIP genérico [49].	25
Figura 14 Fluxograma do processo de transesterificação tradicional com pré-tratamento e catálise alcalina. (A) Reator, (B) Separação (centrifugação ou decantação), (D) Purificação do produto ou recuperação do álcool [55].	29
Figura 15 Reação global de transesterificação [58].	30
Figura 16 Reações consecutivas de transesterificação de triglicerídeos com álcool [59].	30
Figura 17 Estimativa de financiamento da UE para desenvolvimento de biocombustíveis [70].	33
Figura 18 Diagrama esquemático do sistema solar térmico proposto para fornecimento de calor para o processo de produção de biodiesel na injeção de 1000 kg/h de óleo de colza.	38
Figura 19 Fluxograma do processo de produção de Biodiesel.	40
Figura 20 Transesterificação da trioleína [77].	41
Figura 21 Componentes da interface de um projeto no <i>software</i> greenius [81].	46
Figura 22 Consumo mensal do processo industrial.	48
Figura 23 Irradiâncias global horizontal e normal direta para a cidade de Évora.	49
Figura 24 Rendimento do coletor com receptor Schott 2008 PTR70 para diferentes valores de DNI e ângulo de incidência de 0° (fonte: [83]).	53
Figura 25 Fração solar e razão de calor útil mensal do sistema solar ao longo de um ano para um coletor.	64
Figura 26 Variação mensal do calor solar útil, calor fornecido pela caldeira, calor térmico fornecido pelo sistema solar, energia solar disponível para um coletor e da energia térmica consumida pelo processo.	65

Figura 27 Fração solar e razão de calor útil mensal do sistema solar ao longo de um ano para dois coletores.....	66
Figura 28 Variação mensal do calor solar útil, da energia térmica fornecida pelo sistema solar e pela caldeira, da energia térmica consumida pelo processo e da energia solar disponível para dois coletores.....	67
Figura 29 Valores de LCOH e período de retorno em função do custo de investimento específico para o sistema solar proposto.	69
Figura 30 Variação horária da energia térmica fornecida pelo coletor solar, do calor solar útil, da energia térmica consumida pelo processo, do calor fornecido pela caldeira e da energia solar disponível para um coletor no dia 30 de novembro.....	73
Figura 31 Variação horária da energia térmica fornecida pelo coletor solar, do calor solar útil, da energia térmica consumida pelo processo, do calor fornecido pela caldeira e da energia solar disponível para um coletor no dia 21 de julho.	74
Figura 32 Variação horária da energia térmica fornecida pelo campo solar, do calor solar útil, da energia térmica consumida pelo processo, do calor fornecido pela caldeira e da energia solar disponível para dois coletores no dia 30 de novembro.	75
Figura 33 Variação horária da energia térmica fornecida pelo campo solar, do calor solar útil, da energia térmica consumida pelo processo, do calor fornecido pela caldeira e da energia solar disponível para dois coletores no dia 21 de julho.	76
Figura 34 Variação horária da temperatura média do fluido de transferência de calor, do calor solar fornecido ao processo e da energia solar disponível no coletor no dia 21 junho para o sistema com um coletor.....	77
Figura 35 Variação horária da temperatura média do fluido de transferência de calor, do calor solar fornecido ao processo e da energia solar disponível no campo composto para dois coletores no dia 21 junho.....	78

Lista de Tabelas

Tabela 1 Tipos de coletores solares térmicos [33].	15
Tabela 2 Valores de custo específico de investimento em sistemas de energia solar térmica de concentração instalados em indústrias na Europa.	26
Tabela 3 Matérias-primas utilizadas na produção de diferentes gerações de biodiesel [54].	27
Tabela 4 Principais compostos envolvidos na reação de produção de biodiesel a partir de óleo de colza.	39
Tabela 5 Especificações do processo de biodiesel (mistura e pré-aquecimento). ..	42
Tabela 6 Frações molares (mistura e pré-aquecimento).	42
Tabela 7 Condições de operação na torre de destilação.	43
Tabela 8 Frações molares na torre de destilação.	44
Tabela 9 Condições finais de operação.	44
Tabela 10 Frações molares finais.	45
Tabela 11 Características energéticas do estudo.	45
Tabela 12 Altitude e coordenadas geográficas da cidade de Évora.	47
Tabela 13 Dados anuais meteorológicos para a cidade de Évora.	50
Tabela 14 Características do fluido Therminol VP-1 [82].	55
Tabela 15 Custos de instalação para as duas opções de sistema solar térmico propostas neste trabalho.	56
Tabela 16 Características das duas opções para o sistema solar térmico analisado.	63
Tabela 17 Custos do sistema solar térmico para os dois cenários analisados. ...	68
Tabela 18 Resultados anuais para os dois cenários analisados.	71

Nomenclatura

<i>Sigla</i>	<i>Descrição</i>	<i>Unidades</i>
A_{ref}	Área refletora do campo solar	$[m^2]$
A_{rp}	Área dos refletores primários	$[m^2]$
a_1	Coeficiente de ajuste do ângulo de incidência	$[1/^\circ]$
a_2	Coeficiente de ajuste do ângulo de incidência	$[(1/^\circ)^2]$
a_3	Coeficiente de ajuste do ângulo de incidência	$[(1/^\circ)^3]$
b_0	Coeficiente de perdas térmicas do receptor	$[1/K]$
b_1	Coeficiente de perdas térmicas do receptor	$[W/m^2K]$
b_2	Coeficiente de perdas térmicas do receptor	$[W/m^2K^2]$
b_3	Coeficiente de perdas térmicas do receptor	$[W/m^2K^3]$
b_4	Coeficiente de perdas térmicas do receptor	$[W/m^2K^4]$
<i>CAPEX</i>	Custo de investimento inicial	$[€]$
c_{esp}	Custo específico de investimento	$[€/m^2]$
<i>DNI</i>	Irradiância normal direta	$[W/m^2]$
f_{solar}	Fração solar	$[\%]$
$H_{g,H}$	Irradiação anual global horizontal	$[Wh/m^2/ano]$
$H_{dir,n}$	Irradiação direta anual	$[Wh/m^2/ano]$
H_{dif}	Irradiação difusa anual	$[Wh/m^2/ano]$
i	Taxa de desconto	$[-]$
$I_{dir,n}$	Irradiância direta normal incidente nas superfícies dos coletores	$[W/m^2]$
<i>IAM</i>	Modificador do ângulo de incidência	$[-]$
K	Fator de correção do ângulo de incidência modificado	$[-]$
<i>LCOH</i>	Custo nivelado de calor	$[€/kWh]$
<i>OPEX</i>	Custo de operação e manutenção anuais	$[€]$
<i>PR</i>	Período de retorno do investimento	$[anos]$
Q_{boiler}	Energia térmica fornecida anualmente ao processo industrial pela caldeira	$[kWh/ano]$
Q_f	Irradiação solar normal incidente anualmente nos coletores solares	$[kWh/ano]$

Q_{out}	Calor fornecido anualmente pelo campo de coletores	[kWh/ano]
Q_{proc}	Demanda anual de energia térmica pelo processo industrial	[kWh/ano]
$Q_{ss,útil}$	Energia térmica fornecida anualmente ao processo industrial pelos coletores solares (calor solar útil)	[kWh/ano]
$R_{útil}$	Razão de calor solar útil	[%]
Receitas	Receitas anuais associadas ao projeto	[€]
T	Tempo de vida do sistema solar térmico	[anos]

Símbolos do alfabeto grego

ΔT	Diferença de temperatura entre a temperatura média no coletor e a temperatura ambiente	[K]
Δt	Intervalo de tempo	[s]
η_{col}	Rendimento do coletor solar térmico	[-]
η_{limp}	Índice de limpeza da superfície refletora	[-]
η_{opt}	Rendimento ótico do coletor	[-]
η_s	Rendimento do sistema solar térmico	[%]
θ	Ângulo de incidência da radiação solar	[°]

Lista de Siglas e Acrónimos

CCF	Coletores lineares de Fresnel
CPC	Coletores parabólicos compostos
CSP	Energia solar de concentração
CSTR	Reator contínuo de tanque agitado
DLR	Centro Aeroespacial Alemão
FER	Fontes de energia renováveis
GEE	Gases com efeito de estufa
GHI	Irradiância global horizontal
NRTL	<i>Non-random two-liquid</i>
PNEC	Plano Nacional de Energia e Clima 2021-2023
PTC	Coletor cilindro-parabólico
RED II	Diretiva Europeia de Energias Renováveis de 11/12/2018
RNC	Roteiro para a Neutralidade Carbônica 2050
SHIP	Calor solar para processos industriais
UE	União Europeia

1

Introdução

1. Introdução

1.1 Enquadramento

O presente trabalho foca a integração de energias renováveis, nomeadamente energia solar térmica, no processo de produção de biodiesel de maneira que este seja mais sustentável.

A intervenção humana na natureza, nomeadamente através da queima de combustíveis fósseis, contribui significativamente para o acúmulo de gases com efeito de estufa na atmosfera, exacerbando as alterações climáticas e a degradação ambiental [1]. Neste contexto, a aposta na intensificação do uso de fontes de energia renováveis se torna particularmente relevante, visando preservar o ambiente, promover o bem-estar social e assegurar o desenvolvimento económico [2].

Um fornecimento confiável e o uso eficiente de energia são elementos cruciais para impulsionar o desenvolvimento económico e o crescimento sustentável de uma determinada região [3]. Esta é utilizada para diversos fins na indústria, no comércio, nas residências, nos transportes e em outros setores. Para além disso, a energia é também um fator que afeta o bem-estar e a qualidade de vida das pessoas [4].

Na figura 1 se mostra a distribuição do fornecimento de energia mundial em 2021. Se verifica que 80% da energia fornecida mundialmente foi produzida a partir de combustíveis fósseis, enquanto a quantidade de energia produzida a partir de fontes renováveis representou apenas cerca de 15% [5]. A energia produzida a partir da fonte hídrica e da biomassa totalizaram cerca de 12% do fornecimento de energia mundial em 2021 [5]. Por seu lado, a produção de energia solar está incluída nos 3% referentes à categoria “outras”, conjuntamente com a energia eólica, geotérmica, etc.

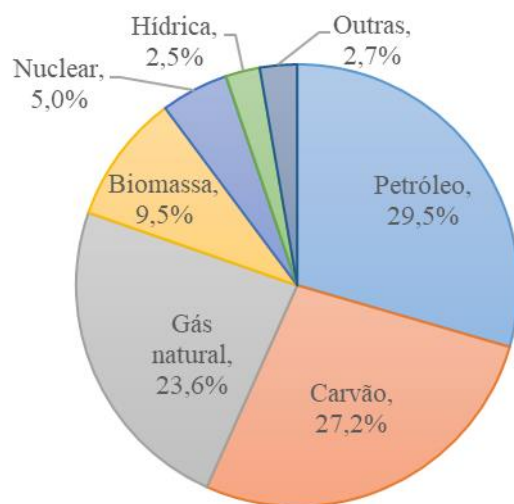


Figura 1 Matriz energética mundial em 2021 (fonte: [5]).

A título de exemplo, as figuras 2 e 3 mostram a evolução do fornecimento de energia total obtida a partir das diferentes fontes energéticas (renováveis e não renováveis) nos cenários mundial e Europeu entre 2000 e 2021. É possível observar um aumento da energia obtida a partir da biomassa e das outras fontes renováveis, como solar e eólica, em ambas as regiões. No Mundo, de uma forma genérica, todas as fontes de energia têm visto um crescimento nas últimas duas décadas. No entanto, na Europa, houve um decréscimo da utilização de carvão e derivados de petróleo como combustível e de energia nuclear.

De entre as fontes de energia renováveis que estão a ganhar proeminência, a energia solar apresenta um enorme potencial devido à sua abundância e à sua capacidade de utilização em diversas aplicações, que vão desde o aquecimento de água até à geração de energia elétrica [6]. Uma das aplicações com imenso potencial de crescimento é o fornecimento de energia térmica a processos industriais.

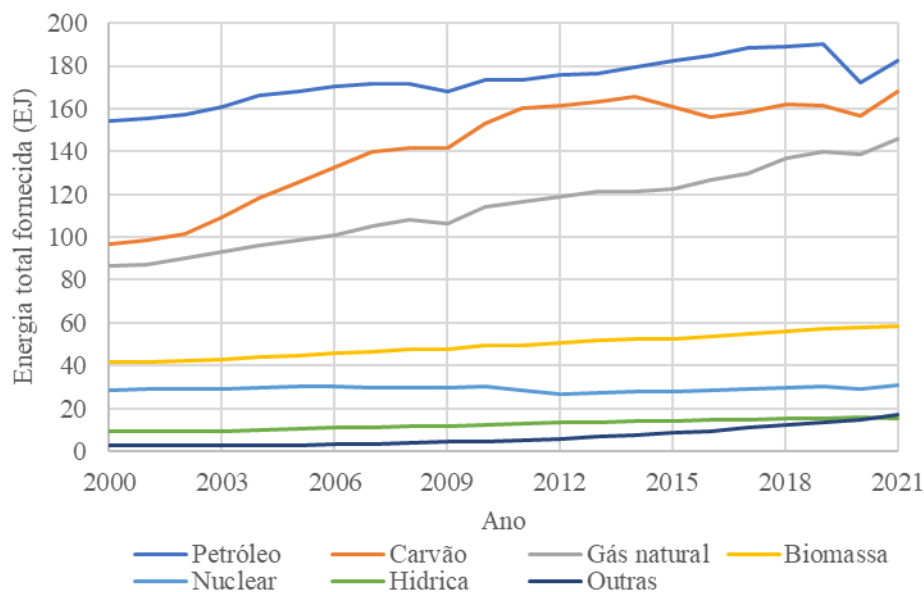


Figura 2 Energia total obtida a partir das diferentes fontes energética no Mundo entre 2000 e 2021 (fonte:[5]).

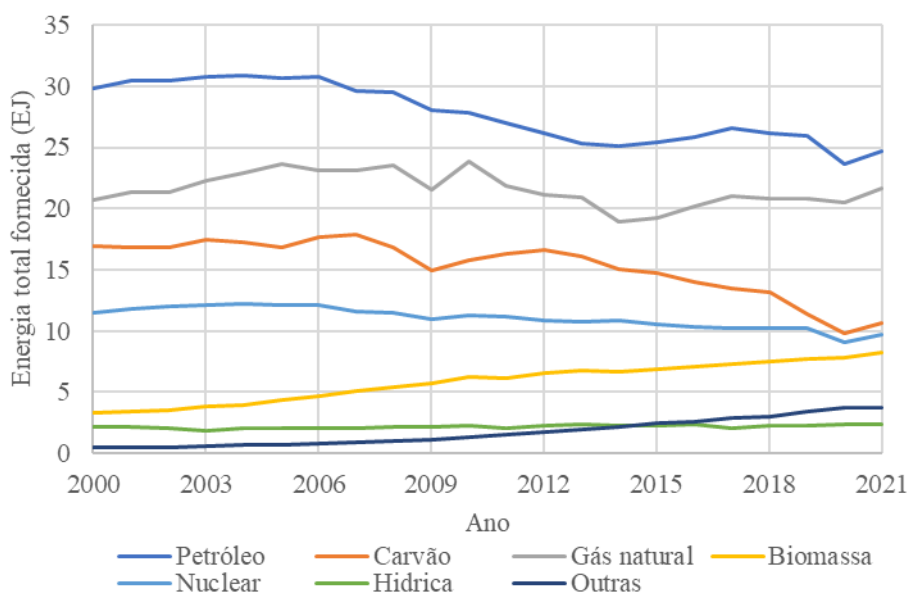


Figura 3 Energia total obtida a partir das diferentes fontes energéticas na Europa entre 2000 e 2021 (fonte: [5]).

A União Europeia (UE) definiu a meta de alcançar a neutralidade carbônica até 2050 e Portugal, como membro da União Europeia, assumiu esse objetivo, tendo aprovado o Roteiro para a Neutralidade Carbônica 2050 (RNC 2050) que estabelece uma nova visão, metas e trajetórias para atingir essa

neutralidade carbônica em 2050 [7]. Nesse quadro, foi constatada a importância de concentrar esforços na redução de gases com efeito de estufa (GEE) na década de 2021-2030 e do recurso às energias renováveis e à economia circular.

O Plano Nacional de Energia e Clima 2021-2023 (PNEC 2030) é o principal instrumento de política energética e climática em Portugal [8]. O país se destaca internacionalmente ao demonstrar resultados positivos nos últimos anos em relação à redução das emissões de gases com efeito de estufa [9]. Em 2021, as energias renováveis representaram 34% do consumo final bruto de energia, colocando-o como o 7º país da União Europeia com maior proporção de fontes de energia renováveis (FER) no consumo final bruto e o 4º país da UE com a maior quota de eletricidade proveniente de FER [9].

Na figura 4 se pode observar a evolução da energia total fornecida em Portugal entre 2000 e 2021. Nesse período se verificou uma importante redução do consumo de energia a partir do carvão e derivados de petróleo e um aumento do consumo de fontes de energia renováveis.

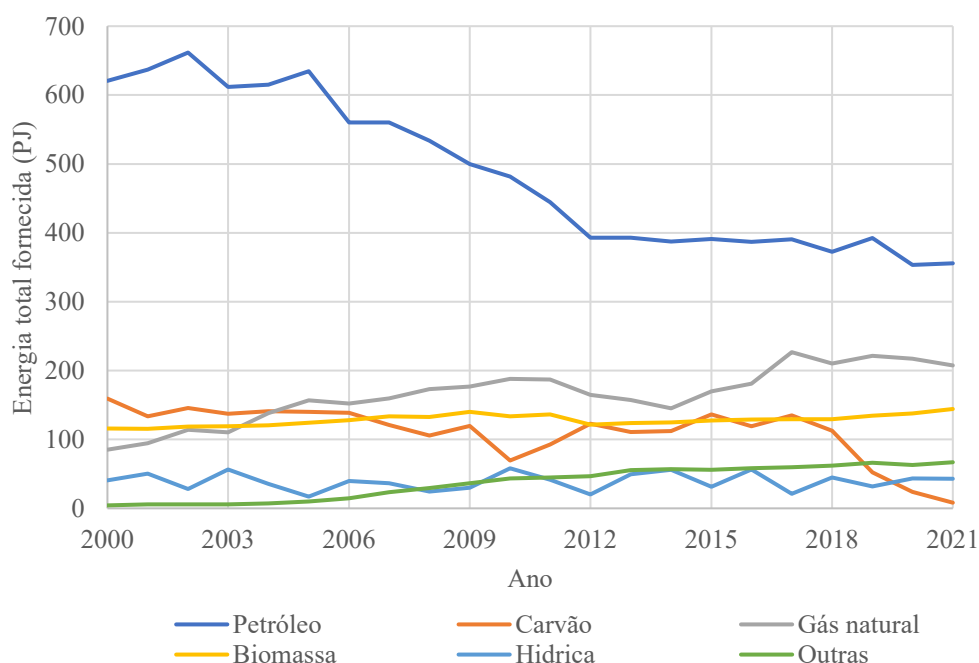


Figura 4 Energia total obtida a partir das diferentes fontes energéticas em Portugal entre 2000 e 2021 (fonte: [5]).

A evolução verificada na figura 4 é o reflexo das políticas energéticas de Portugal. O país definiu uma série de políticas de desenvolvimento das energias renováveis e promoção da eficiência energética [10]. A título de exemplo, se refere que as fontes de energia renováveis representaram aproximadamente 42% do consumo de energia elétrica em setembro de 2023, com um máximo de incorporação de energia solar fotovoltaica de 8% [11]. Em comparação com 2000, houve um aumento do recurso às fontes de energia eólica, solar fotovoltaica e geotérmica no território português. Em 2023, a eletricidade fornecida por fontes de energias renováveis foi a mais elevada de sempre no sistema nacional, correspondendo a 61% do consumo de energia elétrica e uma produção total de 31,2 TWh [11].

As políticas energéticas em Portugal procuram promover um cenário no qual a infraestrutura de energia renovável seja incentivada por meio de políticas financeiras, subsídios e apoio para o desenvolvimento de projetos renováveis no país. Com essa visão, se pretende impulsionar as inovações no campo das energias renováveis, aumentando assim o desenvolvimento tecnológico e proporcionando maior eficiência aos planos econômicos no setor das energias renováveis [8].

Portugal tem experimentado um crescimento na capacidade instalada de energia solar, resultando em uma maior geração de empregos no setor [9]. Tendo o uso de energia solar crescido no país, é de incentivar uma maior aplicação das tecnologias de produção de energia solar térmica na indústria (projetos SHIP – do inglês *Solar Heat for Industrial Processes*). No setor industrial são destacadas necessidades de energia térmica [12]. Uma das indústrias relevantes é a alimentar, onde o recurso à energia solar térmica pode ser muito benéfica em processos como secagem, cozedura e limpeza. A geração de calor de processo a partir da energia solar térmica também pode ser relevante, por exemplo, em processos industriais de revestimento, como a cromagem, fosfatagem e eletrodeposição, e na indústria química, onde é necessária energia térmica para destilação, reações químicas e cristalização, entre outros [13].

No entanto, a utilização de energia solar térmica na indústria se depara com obstáculos, como a dificuldade de integração do calor solar nas operações industriais já estabelecidas e sua otimização [14]. Além disso, os custos da tecnologia solar para os processos industriais são considerados elevados, variando tipicamente entre 250 €/kW e 1000 €/kW, dependendo, entre outros fatores, do tipo de coletores utilizados (como coletores planos e de tubos de vácuo) [14].

1.2 A Indústria dos Biocombustíveis em Portugal

A partir da biomassa, fonte de energia renovável, é possível obter diferentes biocombustíveis, sendo o biodiesel e o bioetanol os principais biocombustíveis produzidos. Estes biocombustíveis podem substituir parcial ou totalmente combustíveis derivados de petróleo. Os biocombustíveis são biodegradáveis, praticamente não contêm enxofre e compostos aromáticos, e os seus impactos no meio ambiente são menores do que os dos combustíveis convencionais [15].

De acordo com a matéria prima utilizada para a produção dos biocombustíveis, estes podem ser classificados como biocombustíveis de primeira geração, segunda geração ou terceira geração. A produção de biocombustíveis de primeira geração se refere a combustíveis produzidos a partir de matérias-primas de origem alimentícia. Esta categoria inclui o bioetanol proveniente da fermentação do açúcar e o biodiesel obtido a partir de óleos e gorduras. Ambos os biocombustíveis são produzidos em larga escala em diversos países, como no Brasil ou Estados Unidos da América, através de processos bem conhecidos [16]. Devido à matéria prima utilizada na produção dos biocombustíveis de primeira geração, estes combustíveis entram em conflito com a alimentação do Homem. Os biocombustíveis de segunda geração são combustíveis obtidos a partir de resíduos lenhocelulósicos ou resíduos de óleos alimentares usados, por exemplo. Quando a matéria prima é lenho-celulósica, os biocombustíveis são tipicamente obtidos recorrendo a processos termoquímicos, tais como gaseificação e pirólise [17]. Os biocombustíveis de terceira geração são obtidos a partir das algas. As algas têm a capacidade de

armazenar lípidos, os quais, depois de extraídos, podem ser utilizados na produção de biocombustíveis. Também a biomassa restante (o que sobra das algas, após a extração dos lípidos) pode ser utilizada como biocombustível [18].

Em 2020, em Portugal, existiam dez produtores de biocombustíveis de regime geral e nove pequenos produtores dedicados [19]. Os produtores de biocombustíveis em Portugal produzem exclusivamente biodiesel, sendo que a maioria utiliza a reação de transesterificação utilizando como matérias primas óleos vegetais, gorduras animal e óleos alimentares usados [19]. Na figura 5 se podem observar as matérias-primas utilizadas para a produção de biocombustíveis e biogás no terceiro semestre de 2023 em Portugal.

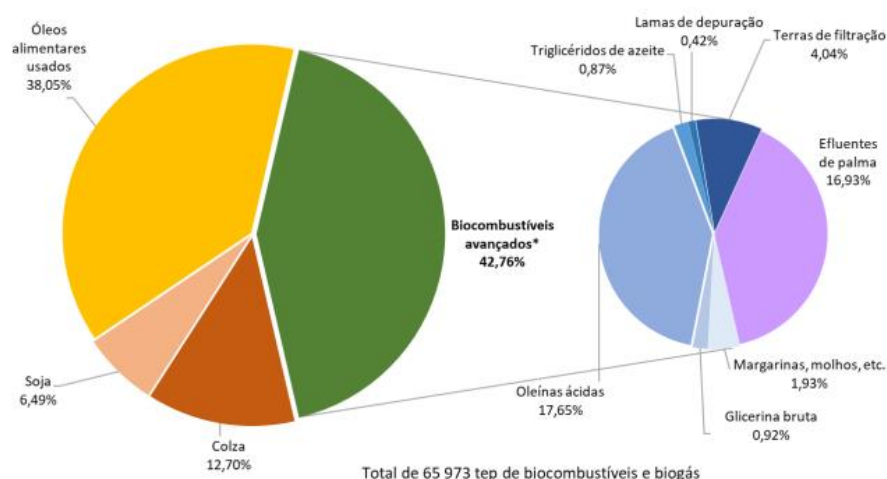


Figura 5 Matérias-primas utilizadas na produção de biocombustíveis e biogás em Portugal no terceiro semestre de 2023 [20].

A produção de energia a partir de biocombustíveis em grande parte dos países do mundo é essencialmente impulsionada pela procura de fontes alternativas de energia que possam garantir a segurança energética, desenvolvimento do setor agrícola e criação de emprego, dependendo das necessidades de cada país [21].

As políticas e programas governamentais que incentivam a redução dos gases com efeito de estufa estão atualmente em destaque, resultando na expansão do desenvolvimento de biocombustíveis [21]. Muitos dos maiores

produtores de biocombustíveis do mundo como os Estados Unidos da América, Brasil, China e Índia focam principalmente na busca da segurança energética e no desenvolvimento do setor agrícola. Por outro lado, os países membros da União Europeia e o Canadá prezam pelas questões ambientais, mas não estão tão centrados no desenvolvimento rural. Para países como o Japão, onde as matérias-primas são escassas, a diminuição do impacto ambiental tem sido um motor do investimento em combustíveis limpos [22].

O custo elevado de produção de biocombustíveis é um dos principais obstáculos à expansão do consumo de energia limpa no setor dos transportes nos países economicamente menos desenvolvidos. Em geral, a falta de infraestruturas, tecnologias de conversão ineficientes e a falta de matérias-primas são responsáveis pelo aumento do custo da produção de biocombustíveis nos países com economias menos desenvolvidas, tornando esta fonte de bioenergia mais cara e menos atrativa em relação aos combustíveis fósseis [23].

Apesar dos benefícios ambientais dos biocombustíveis em geral, e do biodiesel em particular, a sua produção ainda se baseia grandemente na utilização de combustíveis fósseis, contribuindo para a emissão de carbono e perpetuando a dependência de combustíveis não renováveis. Esta dependência evidencia a necessidade de abordagens inovadoras para melhorar a sustentabilidade e a eficiência dos processos de produção de biodiesel. Este trabalho explora a integração de sistemas solares térmicos nos processos de produção de biodiesel como um meio de enfrentar estes desafios e promover a transição para práticas energéticas mais sustentáveis. Ao aproveitar a energia solar para alimentar algumas das etapas do processo de produção de biodiesel, esta integração visa reduzir o consumo de energia fóssil, diminuir as emissões de carbono e melhorar o desempenho ambiental geral da produção de biodiesel.

1.3 Objetivos do Trabalho

A dissertação tem como objetivo analisar a viabilidade técnico-econômica da introdução de um sistema de energia solar térmica para geração de calor para um processo de produção de biodiesel. As necessidades de energia térmica para

o processo industrial foram determinadas a partir da simulação de produção de biodiesel no *software* DWSIM. Por seu lado, a produção do sistema solar térmico proposto foi calculada com recurso ao simulador greenius que permite a análise de diversos tipos de tecnologias renováveis e calcula de forma célere e intuitiva o seu desempenho técnico e econômico.

1.4 Organização da Dissertação

Este trabalho está dividido em cinco capítulos, sendo que o presente capítulo introduz o estudo, apresentando informações iniciais, delimitando o tema, discutindo a problemática da pesquisa e analisando o contributo das energias renováveis no contexto mundial.

No segundo capítulo são apresentadas as informações teóricas fundamentais para o estudo, incluindo uma análise das tecnologias de energia solar térmica para fornecimento de calor de processo e a descrição do processo de produção de biodiesel.

O terceiro capítulo apresenta o caso de estudo analisado, bem como o sistema solar térmico proposto. Os resultados, obtidos com recurso ao DWSIM, das simulações do processo de produção de biodiesel em estudo efetuadas são apresentados e as necessidades energéticas do processo de produção de biodiesel em estudo determinadas. Para além disso, a metodologia utilizada para simular e avaliar o desempenho técnico-econômico do sistema solar térmico proposto é apresentada neste capítulo.

O quarto capítulo apresenta os resultados da simulação do sistema de energia solar térmico proposto e sua discussão. É também apresentada a viabilidade econômica do sistema proposto em comparação com a utilização de um sistema que recorre inteiramente a energia fóssil.

No quinto e último capítulo são descritas as conclusões do trabalho apresentado e se apresentam sugestões para trabalhos futuros na área de estudo.

2

Energias Renováveis: Energia Solar Térmica e Biodiesel

2. Energias Renováveis: Energia Solar Térmica e Biodiesel

Neste capítulo é apresentado um resumo sobre a energia solar térmica, com destaque para a energia solar térmica de concentração e sua integração em processos industriais. São também abordados temas relacionados com a produção de biocombustíveis, incluindo uma análise do mercado dos biocombustíveis. Se explora a integração de sistemas solares térmicos nos processos de produção de biodiesel como forma de reduzir o consumo de energia fóssil, diminuir as emissões de carbono e melhorar o desempenho ambiental.

2.1 Energia Solar Térmica

2.1.1 Energia Solar

O Sol está na origem de quase todas as fontes de energia na Terra, sendo a energia solar fundamental para a manutenção da maior parte da vida no nosso planeta. A radiação solar representa uma imensa fonte energética, recebendo a Terra $1,5 \times 10^{18}$ kWh de energia solar por ano [24], um valor cerca de 8500 vezes superior ao do consumo mundial de energia primária em 2021 ($1,7 \times 10^{14}$ kWh [25]). Esse fato indica que o Sol na prática é uma fonte inesgotável de energia e que a energia solar possui um enorme potencial de utilização em várias aplicações [26].

A figura 6 apresenta uma classificação das diversas formas de aproveitamento da energia solar. O esquema mostra um primeiro nível em que são distinguidas as formas passivas e ativas. A maneira mais fácil de aproveitar a energia solar é através de soluções construtivas passivas que privilegiem a iluminação solar ou o controle natural da temperatura. Enquanto os sistemas solares passivos utilizam elementos arquitetônicos para captar, distribuir e armazenar energia solar térmica, os sistemas solares ativos utilizam equipamentos mecânicos.

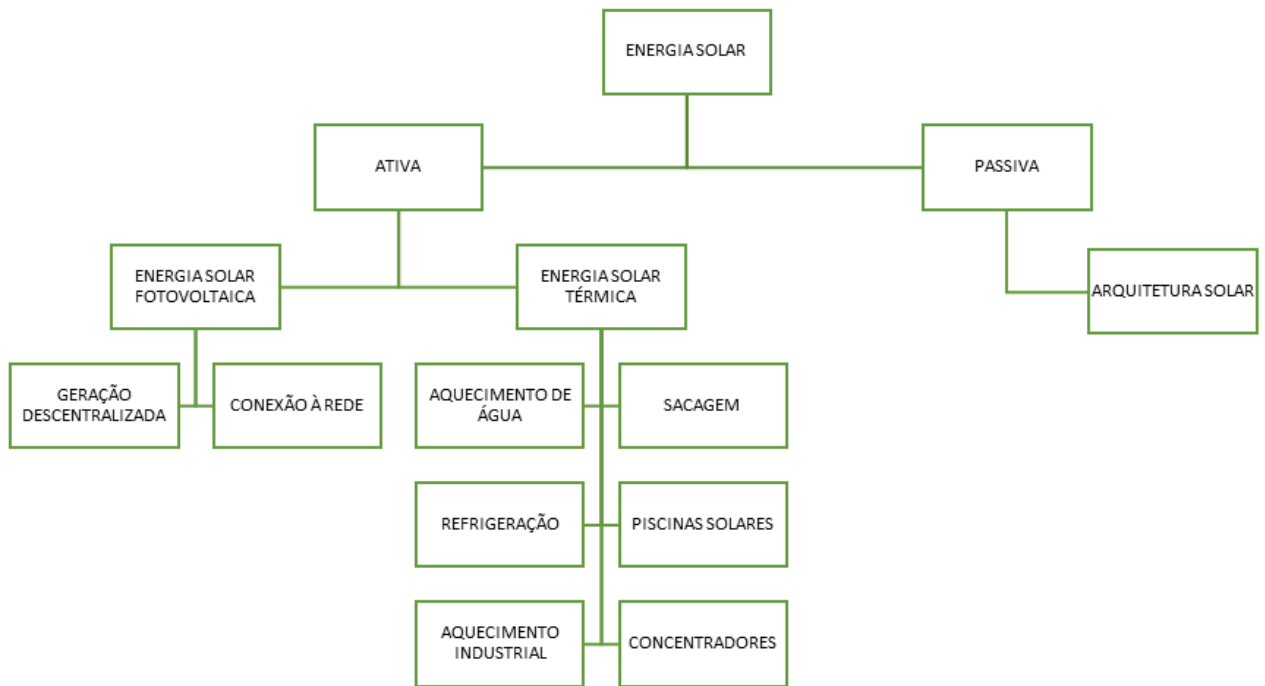


Figura 6 Classificação de formas de aproveitamento da energia solar (adaptado de [27]).

Como se pode observar, a energia solar ativa pode ainda ser classificada em energia solar fotovoltaica e energia solar térmica [28]. Neste trabalho serão aprofundados os temas relacionados com o uso de energia solar para conversão de energia solar em energia térmica para aquecimento industrial em usinas de biodiesel.

Nos sistemas solares fotovoltaicos, a energia solar é diretamente transformada em energia elétrica através do efeito fotovoltaico. Para isso são utilizados materiais semicondutores, como por exemplo o silício [29]. O setor fotovoltaico continua em crescimento, tendo a capacidade em 2022 aumentado 37% em relação ao ano anterior (1185 GWe instalados) [30]. A energia solar fotovoltaica contribuiu com cerca de 6,2% da geração global de eletricidade em 2022, enquanto em 2021 a contribuição foi de 5% [30].

Nos sistemas solares térmicos, a energia solar é convertida em energia térmica. Os principais tipos são: sistemas de aquecimento solar de água, sistemas de aquecimento solar ambiente, centrais solares de torre, centrais com o uso de refletores lineares de Fresnel, centrais com coletores parabólicos entre

outros. Com a evolução dessas tecnologias de produção, sua capacidade instalada tem aumentado cada vez mais [31].

Um sistema solar térmico absorve a radiação solar num coletor/receptor e a converte em energia térmica, que depois é transmitida através de um fluido de transferência de calor (como ar, água, óleo térmico ou sal fundido) adequado para o uso pretendido. Tem havido um desenvolvimento dos fluidos de transferência de calor com materiais avançados que são capazes de lidar com temperaturas elevadas e permanecer em estado líquido a temperatura ambiente [31].

A figura 7 mostra a evolução da capacidade instalada de energia solar térmica de concentração para produção de energia elétrica (CSP – *Concentrated Solar Power*), por país entre 2012 á 2022. Se verifica que a capacidade global instalada aumentou, atingindo 6,3 GW em 2022. Espanha e os Estados Unidos da América são os dois países com maior capacidade instalada, não tendo, no entanto, instalado novas centrais em quase uma década. Nesse período, foi em países como o Chile, China, Israel, Marrocos, África do Sul e Emirados Árabes Unidos que surgiram novas centrais [30].

Concentrando a capacidade global de energia solar térmica, por país e região, 2012-2022

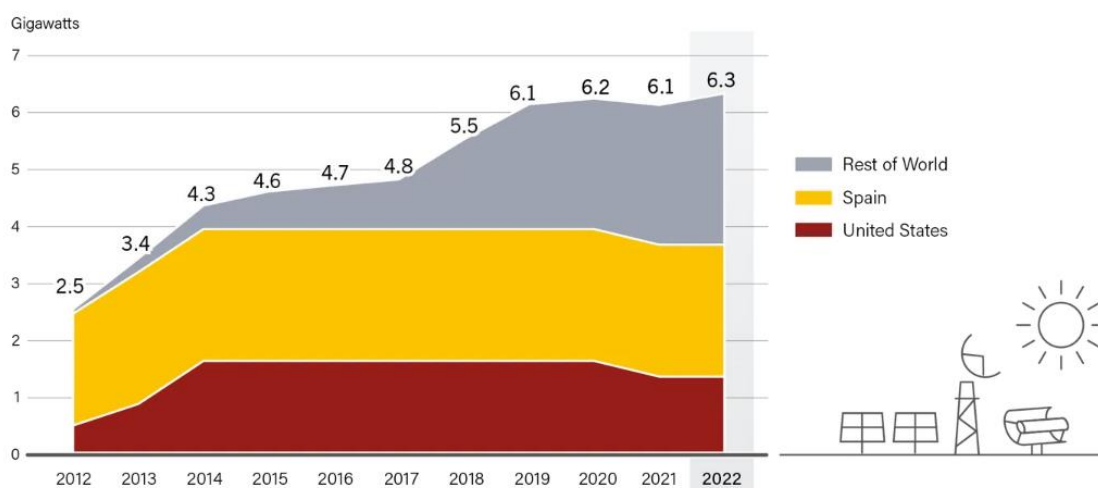


Figura 7 Capacidade de energia solar térmica de concentração para a produção de eletricidade por país entre 2012 e 2022 [30].

A maior parte dos sistemas solares térmicos em operação se destinam a aquecimento de água em edifícios [30]. No entanto, a instalação de sistemas solares térmicos para geração de calor de processo está em forte expansão, com empresas industriais em todo o mundo se voltando para soluções de calor renovável para cumprir metas sociais e ambientais e alcançar a estabilidade dos preços da energia [30]. 2022 foi o ano em que iniciaram a sua operação mais sistemas de aquecimento solar para processos industriais. Nesse ano, 114 novos sistemas SHIP com a capacidade total de 30 MW_t entraram em operação. Essas adições juntaram-se aos sistemas existentes e no fim de 2022 pelo menos 1089 instalações SHIP, totalizando mais de 856 MW_t, estavam fornecendo calor de processo para fábricas em todo o mundo [30].

2.1.2 Sistemas Solares Térmicos

Um sistema solar térmico é constituído por um conjunto de componentes, sendo um dos principais os coletores solares, responsáveis por capturar a energia do Sol [32]. Os coletores solares podem ser classificados em dois tipos principais: não concentradores e concentradores. Um coletor não concentrador tem a mesma área para interceptar e absorver radiação solar, enquanto um coletor solar concentrador possui superfícies refletoras para interceptar e focar a radiação direta solar numa área do absorvedor menor, aumentando assim o fluxo de radiação [32]. Os coletores de concentração são adequados para aplicações de alta temperatura, podendo ser classificados pelo tipo de elemento ótico utilizado para concentrar a radiação solar, o fluido de transferência de calor usado (por exemplo, água, líquido não congelante, ar ou óleo térmico) ou a aplicação específica (geração de eletricidade, aquecimento industrial, etc.). Os coletores solares estão disponíveis no mercado [32]. A Tabela 1 mostra os tipos de coletores solares térmicos existentes.

Tabela 1 Tipos de coletores solares térmicos [33].

	Tipos de Coletores	Tipo de AbsorSOR	Concentração	Temperatura de operação (°C)
Estacionários	Coletores planos	Plano	1	30-80
	Coletores de tubos de vácuo	Plano	1	50-200
	Coletores parabólicos compostos	Tubular	1-5	60-240
5-15			60-300	
Rastreamento de eixo único	Refletores lineares de Fresnel	Tubular	10-40	60-250
	Coletores de calha parabólica	Tubular	15-50	60-300
	Coletores de calha cilíndrica	Tubular	10-85	60-400
Rastreamento de dois eixos	Refletores de disco parabólico	Ponto Focal	600-2000	100-1500
	Coletores de campo de helióstatos	Ponto Focal	300-1500	150-2000

As tecnologias de energia solar térmica podem ainda ser divididas em dois tipos diferentes: estacionárias ou de seguimento, neste último caso com um seguimento a um eixo ou a dois eixos. Os coletores estacionários são um tipo de

coletores solares projetados para capturar a energia do Sol em uma posição fixa ao longo do dia, sem seguir o movimento do Sol [33].

As categorias de coletores solares térmicos estacionários mais comuns são divididas em:

- Coletores planos;
- Coletores de tubos de vácuo;
- Coletores estacionários do tipo concentrador parabólico composto.

Fazer um balanço de energia aos coletores solares térmicos é relevante para conhecer o seu desempenho operacional e determinar a energia que foi absorvida pelo coletor e a que foi perdida. Existem vários parâmetros para caracterizar o desempenho dos coletores (eficiência térmica, eficiência ótica, coeficientes de perdas térmicas, eficiência de conversão, entre outros).

Tipicamente os coletores planos estão cobertos por uma cobertura transparente através da qual passa a radiação solar que incide sobre uma superfície plana absorvedora negra de alta absorvidade. Uma grande parte da energia incidente é absorvida pela placa absorvedora e transferida para o fluido de transferência de calor que circula em tubos. A energia térmica gerada é então transportada pelo fluido de transferência de calor para utilização ou armazenada [33]. Os principais componentes dos coletores planos são a cobertura, o circuito por onde circula o fluido de transferência de calor, a placa absorvedora, as tubulações de entrada e saída de fluido de transferência de calor, o isolamento e a caixa do coletor [33]. Os coletores planos requerem pouca manutenção e sua gama de temperatura de operação é relativamente baixa. Estes tipos de coletores têm baixo custo, bastante seguros em projetos comerciais, sendo por isso uma boa opção nas aplicações de baixa temperatura [34]. A figura 8 mostra um modelo tridimensional de um coletor solar plano.

Por seu lado, os coletores de tubos de vácuo, como o seu próprio nome indica, contém vácuo entre tubos exteriores de vidro que contem um absorvedor de colar no seu interior que absorvem a radiação solar incidente. O coletor pode utilizar superfícies absorvedoras seletivas (projetadas para absorver uma ampla gama de radiação solar) que apresentam uma elevada absorvidade para a

radiação solar e uma baixa emissividade, permitindo reduzir as perdas térmicas por radiação. O vácuo criado entre os tubos e os absorvedores permite reduzir substancialmente as perdas de calor por condução e convecção. Consequentemente, este tipo de coletor é capaz de operar a altas temperaturas com rendimentos elevados (até 80%), não sendo muito afetado pela temperatura ambiente e pelo vento [35].

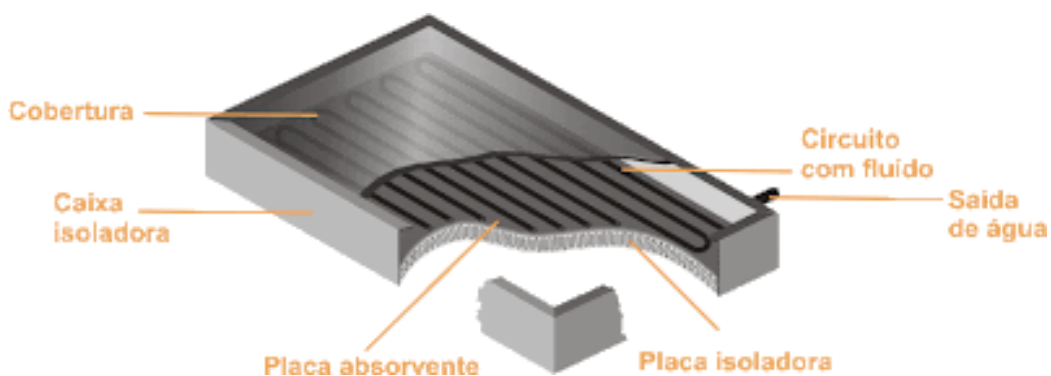


Figura 8 Coletor solar plano [36].

Os coletores parabólicos compostos (CPC) possuem a capacidade de refletir para o absorvedor toda a radiação incidente dentro dos limites do ângulo de aceitação do coletor [32]. Com a sua geometria parabólica aumentam significativamente a eficiência da coleta da energia solar. Os CPC que possuem um refletor composto por duas seções parabólicas refletem a luz solar num ângulo específico com direção ao receptor onde a luz solar é convertida em energia térmica usada em diversas aplicações [32].

Os dispositivos de seguimento são utilizados na maior parte das tecnologias de concentração solar que é oferecida em quatro configurações mais comuns:

- Coletor cilindro-parabólico;
- Coletor linear de Fresnel;
- Solar de torre;
- Coletor de disco parabólico.

Em muitos sistemas de energia solar térmica é necessário ou benéfico armazenar o calor para uso posterior, especialmente quando a demanda de calor não corresponde diretamente à disponibilidade de radiação solar. A energia térmica gerada pode ser guardada na forma de calor sensível ou na forma de calor latente [37].

Genericamente, um sistema de energia solar térmico é composto por um campo solar (que consiste em coletores, receptores/absorvedores, fluido de transferência de calor e sistema de circulação de fluido), um sistema de armazenamento de calor, trocador(es) de calor usado(s) para transferir o calor do fluido de transferência de calor aquecido pelos coletores solares para o meio ou processo que será aquecido, sistema de controle e uma fonte de alimentação. Existem diferentes combinações dessa tecnologia, incluindo hibridação com outras tecnologias [38].

2.1.3 Tecnologias de Coletores Solares de Concentração com Seguimento

Como já foi referido anteriormente, os sistemas solares térmicos podem ser classificados de acordo com o tipo de coletor solar. As tecnologias em destaque para este estudo são as de concentração já que permitem gerar temperaturas elevadas e altas taxas de transferência de calor adequadas ao fornecimento de calor de processo. São relevantes para este estudo as tecnologias de coletores com características de seguimento solar como: coletor cilindro-parabólico, lineares de Fresnel, receptor central ou torre solar e disco parabólico. Nesse capítulo essas tecnologias são apresentadas em termos do seu funcionamento, materiais usados e área de aplicação.

A tecnologia dos coletores térmicos de concentração solar é projetada para aproveitar grandes concentrações de radiação solar, sendo orientada para garantir a melhor angulação de incidência [39]. A razão de concentração, isto é, a relação entre as áreas de abertura e absorção, pode variar em várias ordens de magnitude. A geometria dos coletores solares influencia diretamente a quantidade de energia captada, de acordo com a área de cobertura disponível [40].

2.1.3.1 Coletores Cilindro-parabólicos

O estudo da aplicação da tecnologia de coletores cilindro-parabólicos destaca a sua capacidade de refletir a energia solar em uma grande propagação angular (que significa que podem efetivamente capturar a luz solar incidente mesmo com ângulos variados de incidência ao longo do dia), concentrando-a em um absorvedor central ao longo do sistema [32]. Esses coletores, não estacionários e curvos, possuem uma forma parabólica. Eles são construídos com uma estrutura própria de geometria cilindro-parabólica, composta por superfícies refletoras e são instalados sobre uma estrutura metálica. Nessa estrutura há um dispositivo que permite o seguimento do Sol [32]. Ao longo do foco dos espelhos parabólicos é colocado um tubo absorvedor de maneira que a radiação que incide nos espelhos seja refletida na direção do absorvedor [32]. A tecnologia de coletores parabólicos é a mais avançada das tecnologias solares térmicas de concentração devido à considerável experiência com estes sistemas e também devido ao desenvolvimento da indústria que produz e comercializa esses sistemas [32]. A figura 9 mostra a representação de um coletor cilindro-parabólico e detalhe do seu receptor.

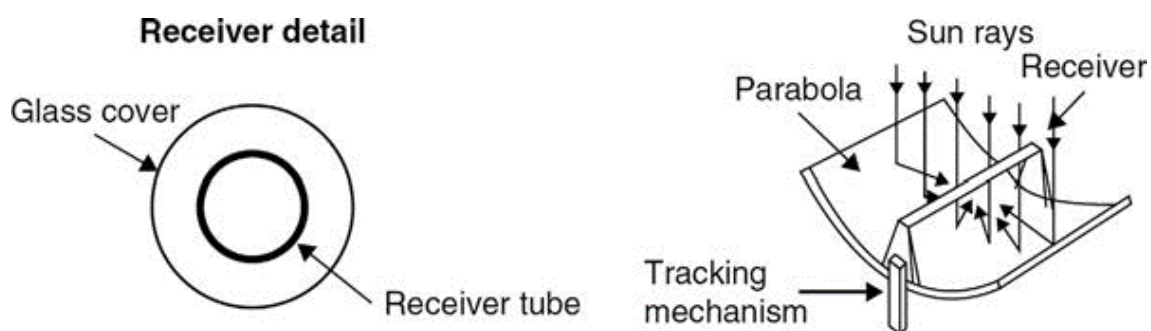


Figura 9 Representação de coletor cilindro-parabólico e detalhe do receptor [32].

Como se observa na descrição anterior, o coletor cilindro-parabólico apresenta os seguintes componentes principais:

- Superfície refletora;

- Tubo absorvedor;
- Fluido de transferência de calor;
- Sistema de seguimento solar;
- Estrutura de suporte.

O receptor é o componente central do sistema cilindro-parabólico, onde a energia solar é concentrada. Um dos seus componentes, o absorvedor, é composto por tubos cilíndricos de metal (geralmente feitos de cobre) revestidos com um material seletivo, e é posicionado ao longo do ponto focal do refletor cilindro-parabólico [32,41]. Um cilindro de vidro é colocado ao redor do absorvedor, podendo ser feito vácuo entre estes dois componentes, a fim de reduzir as perdas de calor ocorridas [41].

Vários fluidos de transferência de calor podem ser usados, como por exemplo [32]:

- Óleos térmicos sintéticos;
- Água ou vapor;
- Sais fundidos;
- Gases pressurizados;
- Nanofluidos.

Os sistemas de coletores cilindro-parabólicos permitem atingir temperaturas da ordem dos 400 °C/450 °C [42, 43] sendo por isso adequados para o aproveitamento de energia solar para geração de eletricidade ou fornecimento de calor para várias aplicações industriais.

2.1.3.2 Coletores Lineares de Fresnel

Os coletores de Fresnel utilizam uma lente ou um espelho de Fresnel e são considerados de grande absorção [32]. Se dividem em dois tipos: o coletor de lente Fresnel e o refletor linear de Fresnel. Este último integra uma série de refletores dispostos em linha que direcionam a radiação solar para um receptor

central linear (figura 10). Se procura assim, evitar a forma parabólica, que é usualmente utilizada nos sistemas de energia solar térmica de concentração. A maior vantagem deste tipo de sistema é que ele pode usar refletores planos, que são mais baratos que os refletores parabólicos convencionais. Além disso, os refletores são montados próximo ao solo, minimizando assim os requisitos estruturais. Uma das desvantagens da tecnologia linear de Fresnel é o sombreamento ocasionado entre refletores adjacentes, o que leva ao aumento dos intervalos entre os refletores. O sombreamento pode ser reduzido, se tendo desenvolvido a tecnologia de refletor linear de Fresnel compacto. Nesta tecnologia o sombreamento do feixe de radiação pelos refletores adjacentes é minimizado, permitindo elevadas densidades de refletores com o consequente aumento de energia concentrada [44]. A figura 10 mostra a representação de um coletor Fresnel Linear.



Figura 10 Imagem de um coletor linear de Fresnel [45].

Como se viu, nos coletores lineares de Fresnel, o refletor é um conjunto de espelhos onde os raios solares são incidentes e refletidos para o elemento receptor. Este é geralmente um tubo absorvedor localizado ao longo da linha focal por cima do receptor. A tecnologia de seguimento solar está presente nessa

tecnologia, se movendo cada espelho de maneira independente, e refletindo os raios solares para o tubo absorvedor.

Apesar de terem uma temperatura de funcionamento inferior aos coletores cilindro-parabólicos, os coletores lineares de Fresnel podem atingir temperaturas na ordem dos 400 °C [42, 43] o que os torna interessantes para a geração de eletricidade solar e calor de processo.

2.1.3.3 Coletores de Disco Parabólico

Ao contrário das duas tecnologias apresentadas anteriormente que apresentam foco linear, a concentração de energia solar feita por coletores de disco parabólico é direcionada para um ponto de focagem pontual. Essa tecnologia utiliza para concentrar a radiação solar um espelho parabólico com a aparência de uma parabólica convencional de televisores (figura 11). Este espelho é desenhado para refletir os raios incidentes no receptor que absorve a energia solar radiante e a converte em energia térmica. A energia térmica pode então ser convertida em eletricidade usando um gerador acoplado diretamente ao receptor ou transportada através de tubagem para um sistema central de conversão de energia. Em alternativa, a energia térmica pode ser utilizada diretamente, por exemplo, para satisfazer as necessidades de calor de um processo industrial. Para conseguir uma maior eficiência os sistemas de coletores de disco parabólico seguem o Sol a dois eixos. A figura 11 representa um coletor de disco parabólico.

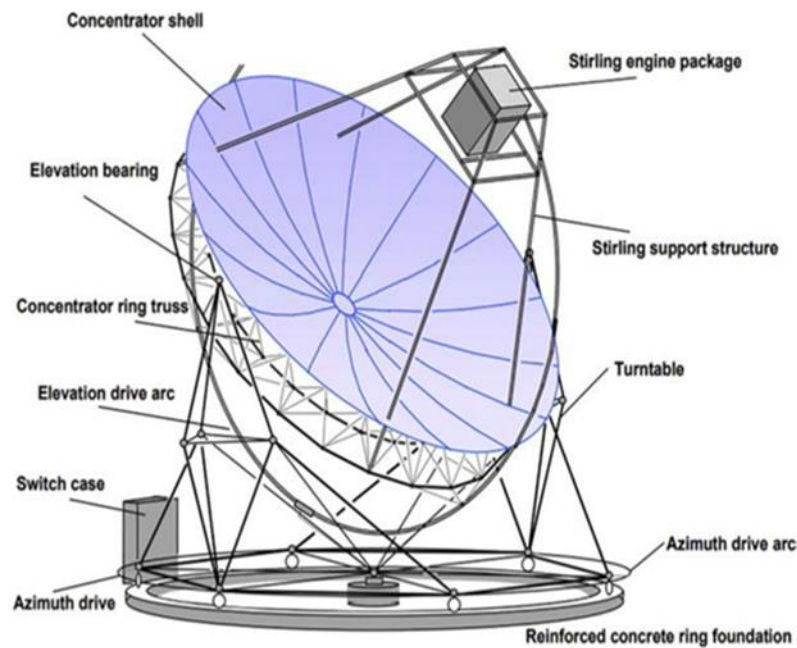


Figura 11 Representação de coletor de disco parabólico [32].

Os sistemas de coletores de disco parabólico podem atingir temperaturas superiores a 1500°C [32] e apresentam várias vantagens importantes [32].

2.1.3.4 Tecnologia Solar de Torre

Outra tecnologia onde a concentração de energia solar é feita pontualmente é a solar de torre. Nela um grande número de heliostatos (espelhos móveis) fazem o seguimento do Sol a dois eixos e refletem a radiação solar para o receptor montado no topo de uma torre (figura 12). O sistema permite alcançar altas razões de concentração, quando comparadas com as de tecnologias de foco linear, se conseguindo atingir elevadas temperaturas de operação ($500^{\circ}\text{C} - 1000^{\circ}\text{C}$) [46]. A energia térmica absorvida no receptor de um sistema solar de torre é transferida para um fluido e será convertida em energia elétrica ou utilizada diretamente. A figura 12 representa um sistema de heliostato.



Figura 12 Imagem de um sistema solar de torre [47].

2.1.4 Integração de Sistemas Solares Térmicos em Processos Industriais

Os processos industriais que integram sistemas solares para fornecimento de energia térmica são complexos e desafiantes. O princípio destes sistemas é coletar energia solar (utilizado coletores planos, coletores de tubos ou coletores cilindro-parabólicos) e fornecer calor diretamente e aos processos industriais. São identificados os pontos de integração, de modo a que a integração de energia solar térmica seja apropriada e benéfica, podendo o fornecimento de calor ao processo industrial ser ministrado de forma parcial ou total [48]. Para o funcionamento dos processos industriais é importante que seja garantido o calor necessário, o que irá influenciar o planejamento e projeto de um sistema solar térmico [48]. O projeto de integração passa por três fases: a pré-viabilidade; estudo da viabilidade e, por fim, decisão e planejamento detalhado [48].

A integração de sistemas solares térmicos em processos industriais já foi estudada anteriormente, devendo existir uma adaptação dos projetos às características do processo térmico. De acordo com Helmke e Heb [49], os sistemas são subdivididos em diferentes partes tais como, o *loop* de coletores, a carga, o armazenamento, a descarga, o ponto de integração e o calor de processo (figura 13). No entanto, algumas dessas partes podem não ser consideradas dependendo da necessidade do sistema.

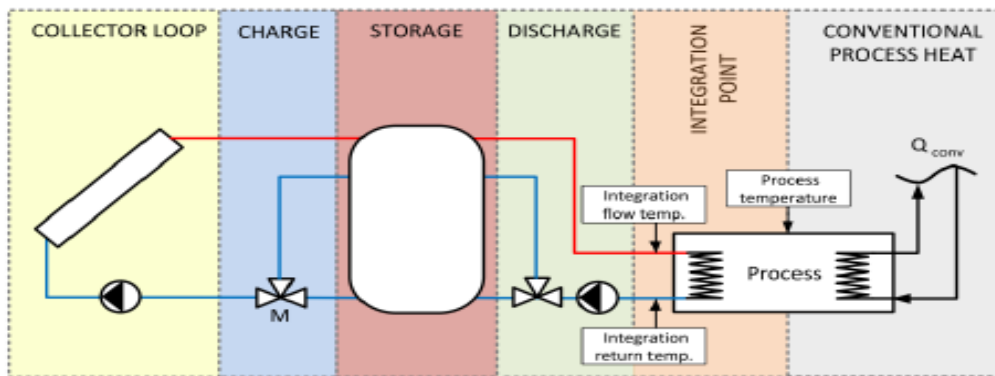


Figura 13 Sistema SHIP genérico [49].

Neste trabalho é avaliada a possibilidade de integração de um sistema solar térmico num processo industrial (produção de biodiesel). Os indicadores de desempenho técnico e econômico exigem uma análise cuidadosa da demanda de calor e uma apresentação de um cenário otimizado de desempenho.

2.1.5 Custos de Sistemas Solares Térmicos de Concentração

Os custos de investimento em tecnologias solares térmicas de concentração apresentam uma considerável variabilidade devido a uma série de fatores, tais como o tamanho do projeto, a escala de implementação, a tecnologia específica utilizada e a localização geográfica. Adicionalmente, ao longo do tempo, se observa uma tendência de diminuição desses custos, impulsionada por avanços tecnológicos e maior investimento nessas tecnologias, entre outros motivos [50]. Neste contexto, se verifica alguma dificuldade em encontrar informações precisas e atualizadas sobre os custos envolvidos na instalação de um sistema solar térmico de concentração para fornecimento de calor de processo.

Para estimar o custo de instalação do sistema solar térmico de concentração proposto neste trabalho, se recolheram e analisaram para diferentes tecnologias os custos específicos, em €/m², reportados no banco de dados SHIP associado ao projeto Energieatlas [51]. Este banco de dados

apresenta informação sobre diferentes instalações solares térmicas para fornecimento de calor de processo existentes no Mundo. Para esta análise, se seguiram as mesmas diretrizes do estudo de Gonçalves [52] se tendo apenas considerado o custo de instalações na Europa. Partindo dos custos obtidos por Gonçalves [52] se adicionaram os custos de projetos entretanto incluídos no banco de dados SHIP. Os custos de investimento incluídos nos dados da plataforma SHIP são referentes a equipamentos, construções auxiliares, sistema de armazenamento de energia térmica, projeto, e instalação e comissionamento sem subsídios.

O banco de dados SHIP apresenta o valor de investimento para sete projetos na Europa baseados em sistemas de coletores cilindro-parabólicos e dois baseados em coletores lineares de Fresnel. A tabela 2 apresenta as médias, medianas, máximos e mínimos dos custos específicos desses projetos. Os valores apresentados na tabela 2 devem ser lidos com algumas reservas já que o número de projetos incluídos no banco de dados é reduzido.

Tabela 2 Valores de custo específico de investimento em sistemas de energia solar térmica de concentração instalados em indústrias na Europa.

Custo específico (€/m²)			
Tipo de tecnologia	Média	Intervalo de custos	Mediana
PTC	794,4	222,2 – 2191,3	488,4
CCF	226,6	140,7 – 312,5	226,6

PTC – Coletores cilindro-parabólicos; CCF – Coletores lineares de Fresnel

2.2 Biodiesel

2.2.1 Processo de Produção de Biodiesel

O biodiesel consiste numa mistura de ésteres alquílicos (metílicos, etílicos, propílicos e butílicos) de ácidos graxos proveniente de matéria-prima renovável, como óleos de plantas e gordura animais.

A primeira etapa para a produção do biodiesel consiste na escolha da matéria-prima que pode ser classificada em três tipos: óleos alimentares (Biodiesel de primeira geração); resíduos e óleos alimentares usados (Biodiesel de segunda geração) e algas (Biodiesel de terceira geração). O biodiesel de primeira geração corresponde ao biodiesel obtido a partir de matérias-primas (óleo alimentar) que entram na alimentação do Homem. Existe, neste caso, uma competição entre a matéria-prima para a produção de biodiesel e para a produção de alimentos. O biodiesel de segunda geração corresponde ao biodiesel obtido a partir de matérias-primas que não competem com a alimentação do Homem. O biodiesel pode ser produzido a partir de um resíduo (por exemplo, um óleo alimentar usado). Neste último caso, transformar um resíduo num biocombustível acrescenta valor econômico ao composto produzido. O biodiesel de terceira geração é obtido a partir do óleo presente no interior das algas. A tabela 3 apresenta algumas das matérias-primas utilizadas para na produção do biodiesel [53].

Tabela 3 Matérias-primas utilizadas na produção de diferentes gerações de biodiesel [21].

Óleos comestíveis	Óleos não comestíveis e resíduos	Outras Fontes
(1ª geração)	(2ª geração)	(3ª geração)
Óleo de soja	Óleo de pongamia	Algas <i>Dunaliella salina</i>
Óleo de girassol	Óleo de pinhão manso	Algas <i>Chlorella vulgaris</i>
Óleo de palma/dendê	Óleo de mamona	<i>Botryococcus braunii</i>
Óleo de colza/canola	Óleo de fritura	
Óleo de algodão	Óleo de peixe	
Óleo de milho	Gordura de porco	
Óleo amendoim	Gordura de frango	
Óleo de coco	Sebo bovino	

Uma das principais matérias-primas utilizadas para produção de biodiesel é o óleo vegetal (biodiesel de primeira geração), o qual é constituído por três moléculas de ácidos graxos ligadas a uma molécula de glicerol (triglicérido). A conversão do triglicéridos em biodiesel, com remoção de glicerol, permite obter um líquido menos viscoso com características mais próximas do diesel obtido a partir do petróleo. A produção de biodiesel pode ser realizada por dois processos: a transesterificação e a esterificação. Numa reação de transesterificação, um éster 1 (triglicéridos) reage com um álcool 1 (metanol ou etanol) originando um éster 2 (ésteres metílicos ou etílicos de ácidos gordos) e um álcool 2 (glicerol) [54]. A figura 14 apresenta o processo de produção de biodiesel por transesterificação. No reator A ocorre a reação de esterificação dos ácidos graxos livres presentes no óleo com metanol e usando ácido sulfúrico como catalisador. Esta reação (uma esterificação) é necessária para converter os ácidos graxos livres em ésteres. A presença de ácidos graxos livres no óleo pode interferir com o catalisador da reação de transesterificação, a qual é realizada na presença de hidróxido de sódio. Se a quantidade de ácidos gordos livres for superior a 5%, pode ocorrer a reação entre os ácidos graxos com o catalisador (NaOH) levando à formação de sabão, produzindo um biodiesel com uma qualidade inferior à desejável. No segundo reator A ocorre a reação de transesterificação do óleo com metanol na presença de NaOH. Posteriormente a esta reação, existem etapas de separação, incluindo decantação, e destilação até obter o biodiesel com as características desejadas. A figura 14 apresenta o fluxograma do processo de transesterificação com pré-tratamento e catálise alcalina.

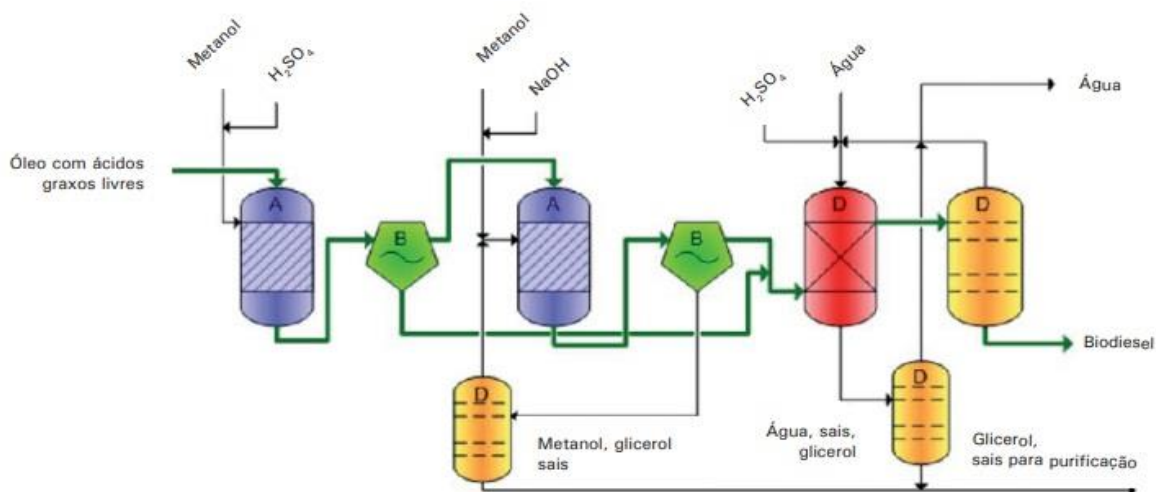


Figura 14 Fluxograma do processo de transesterificação tradicional com pré-tratamento e catálise alcalina. (A) Reator, (B) Separação (centrifugação ou decantação), (D) Purificação do produto ou recuperação do álcool [55].

Após a escolha da matéria-prima é necessário efetuar um pré-tratamento, que consiste numa etapa de filtração do óleo (puro ou usado). A filtração tem como objetivo remover a presença de sólidos do óleo e eliminar a quantidade de água máxima possível para evitar a hidrólise. Após esta etapa, os ácidos graxos livres presentes no óleo são removidos por reação de esterificação com um álcool (metanol ou etanol), na presença de um catalisador ácido (por exemplo, ácido sulfúrico). Posteriormente, após esta etapa, o óleo é lavado para remover o ácido sulfúrico presente, o qual interfere com o catalisador da etapa seguinte (a reação de transesterificação) [54, 56].

A etapa seguinte é a reação entre os triglicéridos presentes no óleo e um álcool (metanol ou etanol), usando uma base como catalisador. Inicialmente, a base (por exemplo, NaOH) é adicionada lentamente ao álcool até à dissolução. Normalmente, é utilizado um excesso de álcool para aumentar o rendimento de ésteres (biodiesel). Após a reação se tem duas fases: uma fase de maior densidade (constituída por glicerol) e uma fase de menor densidade (constituída por biodiesel) [54]. Para que a reação ocorra, é utilizado um catalisador, sendo o mais comumente uma mistura de 0,5% (p/p) de hidróxido de sódio em massa de óleo. É importante referir que esta reação pode ser realizada na presença de catalisadores ácidos e catalisadores básicos. Contudo, nas mesmas condições

de operação, os catalisadores básicos permitem acelerar a reação tornando o processo economicamente mais viável do que os catalisadores ácidos [54].

A reação global da transesterificação entre uma molécula de triglicéridos e três moléculas de álcool é apresentada na figura 15. Na figura 16 se mostram as três reações consecutivas e reversíveis de transesterificação de triglicerídeos com álcool. A primeira reação consiste na transesterificação de uma molécula de um triglicérido com uma molécula de um álcool na presença de um catalisador originando uma molécula de um éster metílico ou etílico de um ácido graxo e um diglicerídeo. A segunda reação traduz a reação entre uma molécula de um diglicerídeo com um álcool, na presença de um catalisador, produzindo uma molécula de um éster metílico ou etílico de um ácido graxo e uma molécula de um monoglicerídeo. Na última etapa, ocorre a reação entre uma molécula de um monoglicerídeo com um álcool produzindo uma molécula de um éster metílico ou etílico de um ácido graxo e uma molécula de glicerol [57].

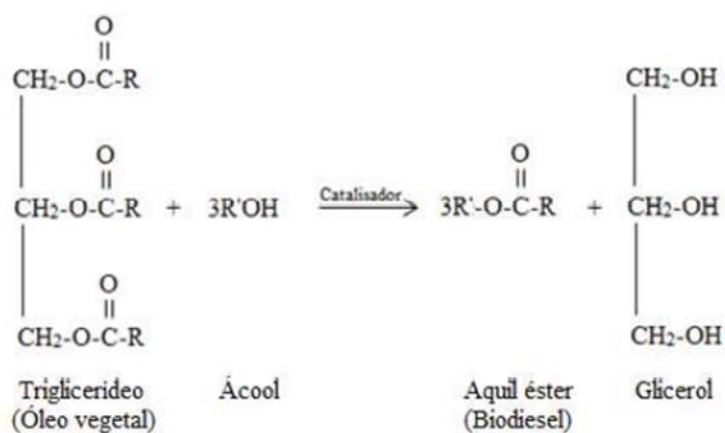


Figura 15 Reação global de transesterificação [58].



Figura 16 Reações consecutivas de transesterificação de triglicerídeos com álcool [59].

Posteriormente à produção do biodiesel, este biocombustível tem de ser purificado antes da sua utilização. Assim, é necessário separar o glicerol do biodiesel, remover o catalisador, o álcool em excesso e algumas impurezas. A remoção do catalisador consistirá em neutralizar com água acidificada. As impurezas podem ser removidas com água quente. A separação do glicerol do biodiesel e do álcool é realizada por decantação. Após a separação do glicerol da restante corrente, constituída por biodiesel e álcool, estes compostos são separados por destilação [54].

A reação de transesterificação dos triglicéridos com um álcool pode ser realizada sem catalisador. Este processo de obtenção de biodiesel utiliza tecnologia supercrítica (ainda em investigação). No entanto, está tecnologia requer temperaturas e pressões elevadas. Este biocombustível pode ser utilizado diretamente ou misturados com diesel. A título de exemplo um combustível B20 e um combustível B100 contêm 20% e 100% de biodiesel incorporado, respetivamente [60].

2.2.2 Mercado dos Biocombustíveis

Nesta subseção se irá descrever o mercado dos biocombustíveis que tem tido um crescimento mundialmente significativo. Assim, será apresentada a situação em diversos países e regiões do mundo.

Atualmente, a dimensão da indústria automóvel é importante, sendo o setor dos transportes responsável por elevados impactos ambientais. Nessa medida, a indústria dos combustíveis, em especial dos biocombustíveis, tem tentado desenvolver novos combustíveis, de forma a minimizar as emissões dos gases com efeito de estufa. As políticas europeias visam a segurança energética, e dessa maneira, impulsionada pelo “pacto verde Europeu”, a percentagem de energias renováveis no setor dos transportes foi de 9,6% em 2022 (em que a quota do biodiesel no setor dos transportes foi de 68,7%, do bioetanol de 16,8%, do biogás de 2,7%, de outros biocombustíveis 0,3% e de eletricidade renovável 11,5%) [61, 62]. Um dos objetivos da UE é a redução da emissão de GEE associada aos biocombustíveis. A utilização dos combustíveis “avançados” (2ª

geração) pode ser considerada como uma solução disponível para a redução das emissões [63]. No entanto, estes biocombustíveis estão em fase de desenvolvimento (escala laboratorial e escala piloto). Uma das indústrias que emite elevada quantidade de gases com efeito de estufa é a aviação em comparação com muito outros setores, na qual a incorporação destes biocombustíveis (biodiesel e biojet (óleo produzido por óleos vegetais, resíduos de lípidos e gorduras de animais)) permitirá reduzir significativamente as emissões destes gases. Atualmente, houve mais de 200 000 voos usando várias combinações de biocombustíveis de aviação considerados renováveis de acordo com a Diretivas de energias renováveis, RED II [64].

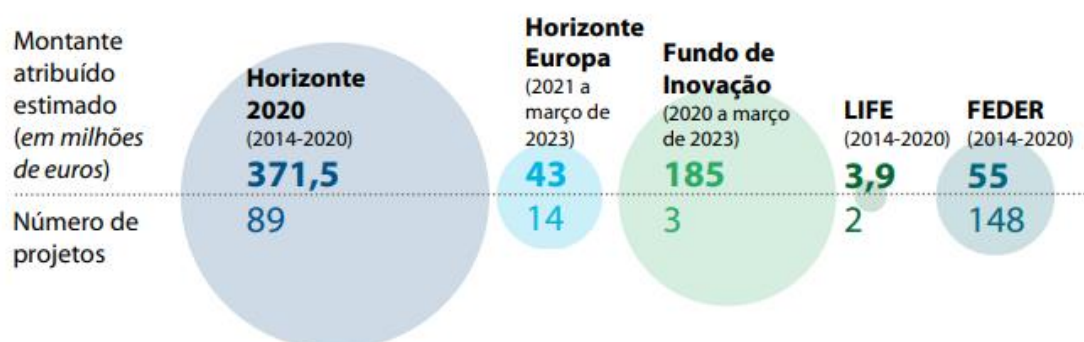
Os países asiáticos têm uma importância muito significativa na utilização de energias renováveis no cenário global. No setor da energia solar, a China tem uma elevada percentagem de produção de tecnologias térmicas (coletores solares) e fotovoltaicas (painéis fotovoltaicos e coletores solares) no mercado internacional. No entanto, tem um menor crescimento no setor dos biocombustíveis em relação a outros países, o que poderá ser explicado pela produção de biocombustíveis a partir de matérias-primas que entram em competição com a nossa alimentação [65, 66]. Entretanto, a China já ocupou a posição de terceiro maior produtor de etanol mundialmente 2021 [67]. Atualmente, a China tem um plano de ação para o pico de dióxido de carbono que promove o uso de biocombustíveis avançados com o bioetanol celulósico e o etanol sintético industrial à base de combustão[66].

Na América do Norte, a produção de biocombustíveis é dinâmica e diversificada. Os Estados Unidos da América são o maior produtor de biocombustíveis do mundo com produção de 1.627 Petajoules e é país um grande produtor de biodiesel, com a produção daquele ano somando 1,64 bilhão de galões [68].

Na América Latina, os países produtores de maior quantidade de biocombustíveis são o Brasil, Argentina e Colômbia. Mundialmente, o Brasil está em segundo lugar na produção de biocombustíveis enquanto a Argentina é o quinto. A América Latina está entre as regiões que tem uma potencial os setores da produção de biocombustíveis, com a criação de infraestruturas para o

aumento a capacidade instalada em diferentes países [68, 69]. Em relação ao biodiesel, Brasil e Colômbia apresentam uma taxa de mistura obrigatória semelhante no óleo diesel comercializado impulsionado a produção do biocombustível [68, 69].

Na Europa, as políticas relacionadas com as energias renováveis reduziram o apoio aos biocombustíveis produzidos a partir de culturas que competem com a alimentação do Homem (biocombustíveis de 1ª geração), para promover os biocombustíveis avançados (2ª geração) que não usam culturas alimentares [70]. Na Europa, as produções mais relevantes de biocombustíveis são de biodiesel e bioetanol. Em 2020, a Europa produziu 302 milhões de barris de biocombustíveis, e a expectativa de certos países, como a Alemanha e a Finlândia, de serem um dos maiores produtores de biocombustíveis do mundo conduz ao financiamento de projetos relacionados com os biocombustíveis [70]. A figura 17 apresenta a estimativa de financiamentos para o biocombustível na UE.



Nota: os números incluem apenas os projetos identificados pelo Tribunal durante a auditoria (até março de 2023), pelo que podem não ser exaustivos.

Figura 17 Estimativa de financiamento da UE para desenvolvimento de biocombustíveis [70].

Vários estudos demonstram que há a possibilidade de expansão da produção dos biocombustíveis [21]. Muitas das tecnologias de produção de biocombustíveis são ainda recentes e é imperativo torná-las mais rentáveis e renováveis. Uma possibilidade que pode ajudar a atingir estes objetivos é a utilização de energia solar para fornecer energia aos processos de produção de

biocombustíveis. O fornecimento de energia solar poderá satisfazer tanto as necessidades elétricas como as de aquecimento e arrefecimento, sendo notórias as variadas aplicações dos sistemas solares instalados mundialmente onde é utilizada como fonte energética auxiliar ou como fonte principal.

2.2.3 Simuladores de Processos Químicos

Os simuladores de processos químicos são programas de computador que interligam modelos de operações industriais e pacotes de propriedades físico-químicas para modelar, simular e controlar processos industriais [71]. As empresas utilizam esses tipos de ferramentas para avaliar processos completos, em vez de somente operações únicas, a fim de desenvolver operações eficientes [72].

Os simuladores de processos reproduzem um comportamento real de maneira limitada e necessitam ser verificados com experimentos ou dados reais. Além disso, facilitam o trabalho dos engenheiros na construção e resolução de problemas, monitorando erros, estabilizando automaticamente e ajustando soluções para manter padrões de precisão [73].

As ferramentas de simulação desempenham funções como: criar diagramas de fluxo de processos, gerar balanços de massa e energia, dimensionar equipamentos e avaliar custos operacionais e de capital [72].

Para que as simulações ocorram é preciso inserir os compostos utilizados no processo. Uma vez selecionado um composto, um pacote termodinâmico apropriado deve ser empregue com base nas relações de equilíbrio entre os componentes e como eles se comportam quando misturados. Ao desenvolver uma simulação, devem ser fornecidos os parâmetros (caudal, temperatura, pressão e composição) relacionados com a corrente de entrada para cada operação. Deste modo, o equipamento a ser utilizado deve ser selecionado e inserido corretamente no fluxograma do simulador [71].

Existem alguns simuladores de processos que são amplamente utilizados na produção como: Aspen Plus, Aspen HYSYS, UniSim Design e ProSimPlus. O Aspen Plus® é um *software* de otimização de processos produzido pela

AspenTech para projeto, operação e otimização nas indústrias (bio)química e de polímeros [57].

O Aspen HYSYS (*HYprotech SYStem*), também comercializado pela AspenTech, é uma ferramenta para simulação e otimização de processos na indústria de produção de petróleo e gás, refinarias e empresas de engenharia. West, Posarac e Ellis [74] projetaram quatro plantas de biodiesel usando Aspen HYSYS. Eles realizaram uma análise comparativa dos custos operacionais e de investimento de plantas que utilizam catalisadores alcalinos e ácidos homogêneos, heterogêneos e metanol supercrítico [57].

O UniSim Design produzido pela Honeywell melhora muito a simulação e otimização de processos *online* e *offline* e auxilia na determinação do fluxo de trabalho e os equipamentos necessários para os processos. O ProSimPlus, desenvolvido pela ProSim, é um *software* flexível que realiza cálculos rigorosos de balanço de massa e energia para diversos processos estacionários. Além desses simuladores de processos também há os que são abertos para uso não comercial, como o DWSIM. Este simulador possibilita que estudantes de engenharia e engenheiros químicos adquiram o *software* gratuitamente [57].

3

Metodologia

3. Metodologia

Nesse capítulo, se apresentam as diversas considerações tecidas para elaboração do caso de estudo, a simulação do processo de produção de biodiesel utilizando o DWSIM e a metodologia utilizada para simular e avaliar o desempenho técnico-econômico do sistema solar térmico de concentração proposto neste estudo.

3.1 Descrição do Caso de Estudo

O caso de estudo deste trabalho é a introdução de um sistema de energia solar térmica de concentração numa usina de produção de biodiesel. Este subsetor industrial tem elevadas necessidades de calor de processo a relativamente altas temperaturas. O que se propõe é que o sistema solar térmico providencie parte da energia térmica necessária para a produção de biodiesel, sendo a restante energia fornecida por uma caldeira a gás natural. Na figura 18 se pode observar o diagrama esquemático do sistema solar térmico proposto.

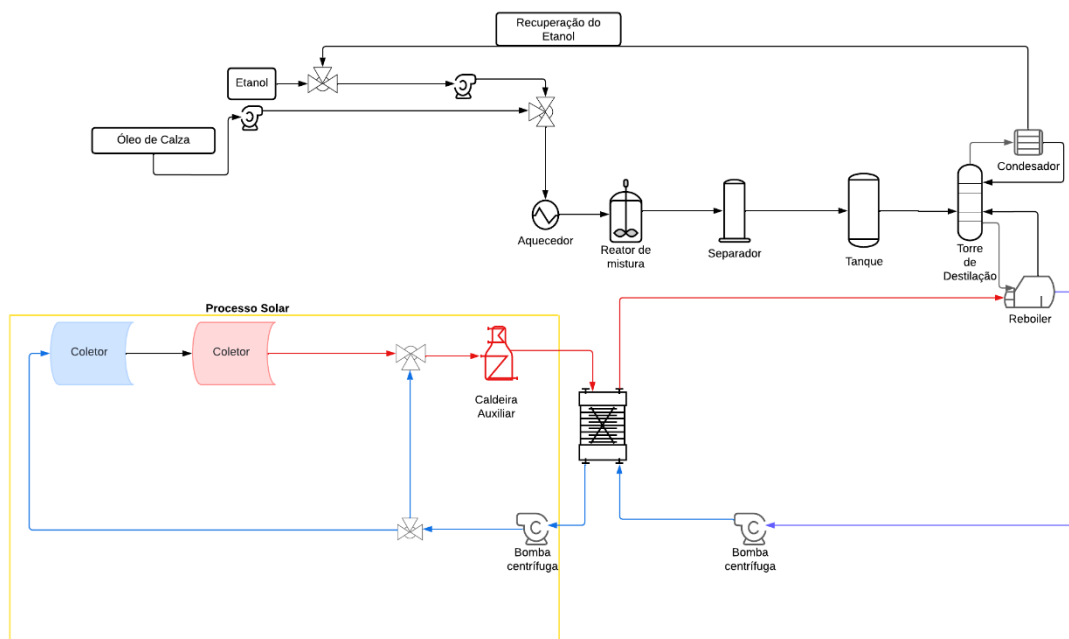


Figura 18 Diagrama esquemático do sistema solar térmico proposto para fornecimento de calor para o processo de produção de biodiesel na injeção de 1000 kg/h de óleo de colza.

Neste trabalho se considerou que a capacidade de processamento de óleo de colza da usina de biodiesel onde se irá integrar o sistema solar é de 1000 kg/h. Se considerou igualmente que a matéria-prima para a produção desse biodiesel é óleo de colza virgem. Esta opção se prende com o facto deste óleo ser uma importante matéria-prima para a produção de biodiesel na Europa (53 % do óleo de colza importado é utilizado na produção do biodiesel) [75].

3.2 Simulação do Processo de Produção de Biodiesel

Este subcapítulo apresenta a simulação da usina de biodiesel considerada no caso de estudo, sendo o processo produtivo dividido nas seguintes etapas: entrada de matérias-primas no processo, transesterificação, destilação do biodiesel, recuperação do etanol e purificação e saída do biodiesel.

Para a simulação da usina de biodiesel, se considerou que o óleo de colza virgem é representado por um dos seus principais componentes, a trioleína, que é representativa da composição geral dos triglicerídeos encontrados nos óleos

vegetais [76]. Como representativo do biodiesel produzido se considerou o oleato de etilo. Os principais compostos químicos envolvidos no processo produtivo são a trioleína, etanol, glicerol, água, hidróxido de sódio e oleato de etilo (tabela 4).

Tabela 4 Principais compostos envolvidos na reação de produção de biodiesel a partir de óleo de colza.

Compostos	Fórmula química	Massa volúmica	Massa molecular
Água	H ₂ O	0,997 g/m ³	18,01 g/mol
Etanol	C ₂ H ₅ OH	0,789 g/m ³	46,07 g/mol
Oleato de Etilo	C ₂₀ H ₃₈ O ₂	0,870 g/m ³	310,52 g/mol
Glicerol	C ₃ H ₅ (OH) ₃	1,26 g/cm ³	92,02 g/mol
Trioleína	C ₅₇ H ₁₀₄ O ₆	0,950 g/cm ³	885,445 g/mol
Hidróxido de Sódio	NaOH	2,13 g/cm ³	39,99 g/mol

As suas diretrizes foram traçadas com um processamento de 1000 kg/h de óleo de colza. Como já referido, a produção de biodiesel consiste na operação da transesterificação em que utilizou etanol como reagente (na proporção de 1:6 molar) e NaOH como catalisador (proporção 1%). A operação é realizada com excesso de reagente. Na figura 19 mostra o fluxograma da produção de biodiesel proposta. O fluxograma consiste em cinco etapas principais, no cenário com uso do óleo de colza.

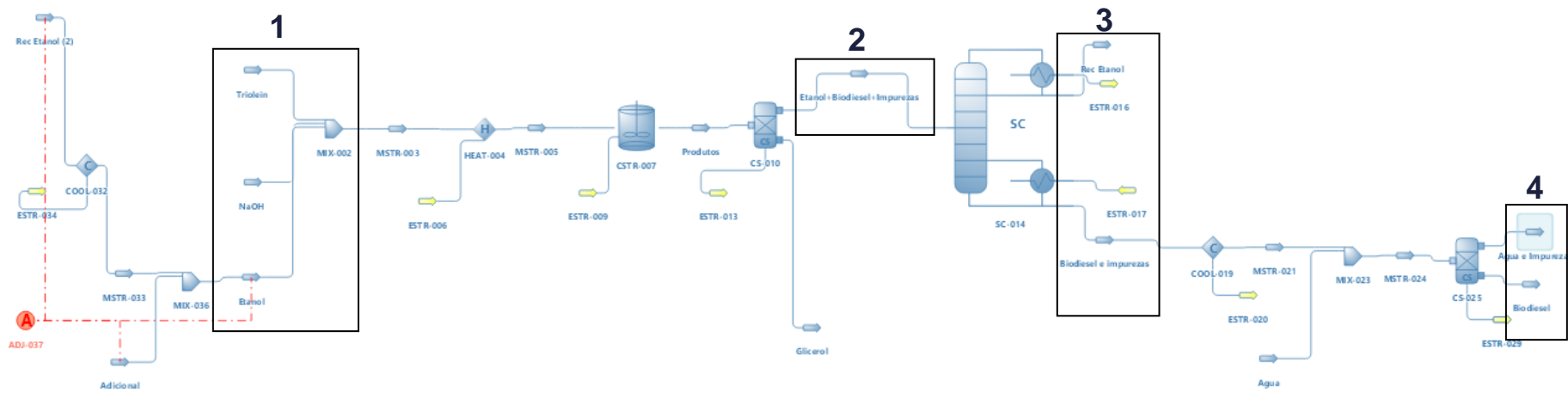


Figura 19 Fluxograma do processo de produção de Biodiesel.

Primeiramente, são introduzidas as correntes de óleo, etanol e catalisador que passam por um misturador. A mistura é posteriormente aquecida a uma temperatura de 80°C, o que auxilia o processo de transesterificação. De seguida, a corrente aquecida é introduzida num reator tipo tanque com agitação mecânica. A reação de produção de biodiesel utilizada foi inserida no simulador DWSIM, estando a transesterificação da trioleína apresentada na figura 20.

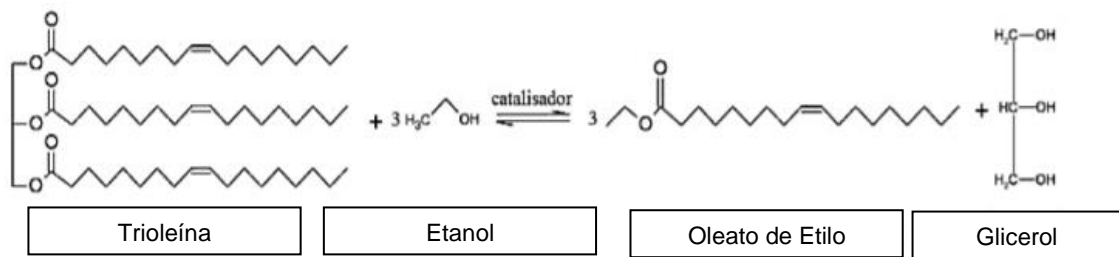


Figura 20 Transesterificação da trioleína [77].

O fluxograma proposto (figura 19) apresenta entradas relacionadas com a mistura dos compostos no misturador. Neste tanque são misturados a trioleína, o etanol e NaOH com um caudal de mistura de 1310 kg/h e pressão 103,3 kPa. A tabela 5 mostra as características dos compostos antes de serem introduzidos no misturador e depois da operação de mistura e aquecimento a 80 °C (corrente 1). A tabela 6 mostra as composições da corrente 1 (em percentagens molares). Posteriormente, esta corrente é enviada para o reator.

Tabela 5 Especificações do processo de biodiesel (mistura e pré-aquecimento).

Condições Operacionais	Trioleína	NaOH	Etanol	Corrente 1
Temperatura (°C)	25	25	25	80
Pressão (kPa)	103,30	103,30	103,30	103,30
Caudal mássico (kg/h)	1000	10	300	1310
Caudal molar (kmol/h)	1,13	0,25	6,51	7,89

Tabela 6 Frações molares (mistura e pré-aquecimento).

Composto	Trioleína	NaOH	Etanol	Corrente 1
Etanol	0,0000	0,0000	1,0000	0,8274
NaOH	0,0000	1,0000	0,0000	0,0312
Trioleína	1,0000	0,0000	0,0000	0,1430
Oleato de Etilo	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Glicerol	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000

No processo (e simulação) proposto é utilizado um reator do tipo tanque com agitação mecânica, do tipo reator contínuo de tanque agitado (CSTR). Foi considerada uma reação de transesterificação entre a trioleína e o etanol, na presença de hidróxido de sódio (o catalisador) se formando o oleato de etilo (o biodiesel) e glicerol. A cinética da reação é dada por [78], sendo a sua reação descrita por:



A cinética de reação de ordem direta (r) e reversa (r') obedecem às seguintes equações:

- $r = k \times [\text{Etanol}] \times [\text{trioleína}]$
- $r' = k' \times [\text{glicerol}] \times [\text{Oleato de Etilo}]$

Após a reação, a composição em oleato de etilo e glicerol é 42,86% e 14,28 %, respetivamente. No separador são isolados o glicerol com uma quantidade de matéria de 103,89 kg/h e o biodiesel com impurezas com 1206,11 kg/h em composição de 50% de oleato de etilo e 41% de etanol e outras impurezas, dessa maneira sendo a corrente 2 do sistema.

Posteriormente, a corrente que sai do reator segue para uma etapa de separação, onde ocorre a separação do biodiesel das impurezas e do glicerol. Após esta etapa, o biodiesel produzido com etanol) é encaminhado para a torre de destilação. A purificação do biodiesel é realizada numa torre de destilação, na qual existe uma parte do vapor de saída do condensador que é injetada novamente na uma torre de destilação com 10 pratos teóricos, com o objetivo de recuperar o etanol em excesso. A torre de destilação foi inserida com taxa de refluxo de 1,5 e com pressão no condensador e *reboiler* de 103,3 kPa. Se utilizou o modelo NRTL (*non-random two-liquid model*) para realização dos cálculos. O NRTL é um modelo termodinâmico utilizado para descrever comportamento líquido-líquido em um sistema binário ou ternário [79]). A tabela 7 mostra as condições de operação da torre de destilação, enquanto a tabela 8 mostra as frações molares na torre de destilação. Se considerou que a terceira corrente corresponde à mistura de biodiesel e etanol.

Tabela 7 Condições de operação na torre de destilação.

Condições Operacionais na Torre de Destilação	Corrente 3	Biodiesel e impurezas	Etanol de recuperação
Temperatura (°C)	80	208,39	78,66
Pressão (kPa)	103,30	103,30	103,30
Caudal mássico (kg/h)	1206,11	1053,84	152,266

Tabela 8 Frações molares na torre de destilação.

Composto	Corrente 3	Biodiesel e impurezas	Etanol de recuperação
Etanol	0,4621	0,0001	0,9875
NaOH	0,0364	0,0677	0,0000
Trioleína	0,0001	0,0003	0,0000
Oleato de Etilo	0,5000	0,9218	0,0001

Com o objetivo de remover as impurezas presentes no biodiesel que sai da torre de destilação, se simulou um tratamento que consistiu na lavagem deste biocombustível com água. Assim, se utilizou água a 60 °C e com um caudal de 1000 kg/h. Esta lavagem ocorreu num tanque de separação (extração) líquido-líquido. Após esta etapa, o caudal de uma das correntes de saída foi de 1012,66 kg/h (água) e da outra 1041,12 kg/h (biodiesel). A corrente 4 (constituída por biodiesel e impurezas e água) tem apenas 0,01% de impurezas. A tabela 9 mostra as condições desta operação, enquanto a tabela 10 mostra as respetivas frações molares.

Tabela 9 Condições finais de operação.

Condições Operacionais na Torre de Destilação	Corrente 4	Água e impurezas	Biodiesel
Temperatura (°C)	75,17	75,15	75,17
Pressão (kPa)	101,30	101,30	101,30
Caudal mássico (kg/h)	2053,84	1012,66	1041,12

Tabela 10 Frações molares finais.

Composto	Corrente 4	Água e impurezas	Biodiesel
Etanol	0,0006	0,0006	0,0000
NaOH	0,0041	0,0044	0,0000
Trioleína	0,0000	0,0000	0,0000
Oleato de Etilo	0,0566	0,0000	1,0000
Água	0,9385	0,9949	0,0000

A planta para a produção de biodiesel foi simulada no DWSIM e foi projetada para manter uma produção de biodiesel a partir de 1000 kg/h de óleo de colza. Para isso, é necessário fornecer 513 kW_t no *reboiler* da torre de destilação e remover 445,38 kW_t no condensador da torre de destilação (tabela 11). Neste estudo, se considerou que o sistema solar térmico irá fornecer energia ao *reboiler* da torre de destilação, pelo que se terá de estimar as necessidades de energia térmica a serem satisfeitas.

Tabela 11 Características energéticas do estudo.

Torre de destilação		
Condensador	-445,38	kW _t
Reboiler	513	kW _t

Na simulação do processo produtivo de biodiesel a partir de 1000 kg/h de óleo de colza realizada neste estudo se obteve a temperatura relevante para o dimensionamento do sistema solar térmico: a temperatura do biodiesel com impurezas à saída do produto no *reboiler* tem uma temperatura de saída de 208,39°C. Adicionalmente, o condensador tem temperatura de saída de 78,66 °C. Para o estudo foi avaliada a demanda energética no *reboiler*, e dessa maneira a temperatura 208,39°C a qual é tem relevante na avaliação térmica.

3.3 Simulação do Sistema Solar Térmico

3.3.1 Software Greenius

Para simular o sistema solar térmico proposto foi utilizado o *software* greenius desenvolvido pelo Instituto de Investigação Solar do Centro Aeroespacial Alemão (DLR) [80]. O greenius é uma ferramenta de acesso livre que permite calcular o desempenho tecno-econômico, com resolução horária, de usinas de energia solar de concentração. O seu principal foco são os projetos de energia solar térmica de concentração para geração de eletricidade; no entanto vem sendo implementados modelos para outros usos da energia solar térmica e para outras tecnologias renováveis, como sejam as aplicações de calor de processo, centrais fotovoltaicas e parques eólicos.

A interface dos projetos criados no *software* greenius está dividida em quatro separadores: três referentes a dados de entrada (local do projeto, tecnologia e economia) e uma à apresentação de resultados (figura 21).

O diagrama mostra a interface do software greenius, organizada em quatro seções principais, cada uma com sub-seções de dados de entrada ou resultados. O nome 'greenius' está escrito em verde à esquerda. As seções são:

Local do projeto	Nação
	Localização
	Curva de carga e estratégia de operação
	Meteorologia
Tecnologia	Caracterização do coletor
	Campo dos coletores
	Armazenamento térmico
	Caldeira
Economia	Custos
	Tempo
	Financiamento
Resultados	Ano típico de operação
	Fluxo monetário
	Resultados chave

Figura 21 Componentes da interface de um projeto no *software* greenius [81].

De seguida se passam a descrever os dados de entrada considerados na simulação do sistema solar térmico para fornecimento de calor de processo

proposto neste trabalho organizados nas três categorias apresentadas na figura 21.

3.3.2 Local do Projeto

Em qualquer projeto de energia solar a localização (latitude, longitude e altitude) é um fator muito importante que está diretamente relacionado com os valores de irradiação disponível diariamente e que influenciam a produção de energia térmica para o processo industrial. Se considerou que a localização da usina é cidade de Évora, no distrito de Évora, em Portugal. A tabela 12 mostra as coordenadas geográficas e a altitude da cidade de Évora.

Tabela 12 Altitude e coordenadas geográficas da cidade de Évora.

Latitude	38,59° N
Longitude	7,96° W
Altitude	314 m

Para além da localização do sistema solar foi necessário especificar as características do solo em que está implementado o sistema solar térmico. Foi considerado um solo argiloso, com uma rugosidade de 0,1 m e um albedo de 0,2 [82].

Outros dos dados necessários ao dimensionamento do sistema solar térmico se relacionam com a curva de consumo e estratégia de operação do sistema solar térmico. Pelas simulações apresentadas no subcapítulo anterior, se verifica que é necessária uma potência de 513 kW_t para o *reboiler*. Os trocadores de calor que transferem energia do sistema solar para a fonte de calor do *reboiler* utilizam óleo térmico que irá aquecer o biodiesel que reentra no *reboiler*.

Se considerou que a usina de produção de biodiesel e, portanto, o sistema solar térmico funcionam sete dias da semana das 09:00 h às 18:00 h e durante

11 meses, ou seja, durante 334 dias, se reservando um mês para manutenção do maquinário e férias dos funcionários. Tendo em conta o período de laboração da usina e a potência térmica necessária (contínua e constante nesse período) de 513 kW_t, se criou a curva de consumo de energia térmica. Na figura 22 se pode observar o consumo mensal de energia térmica, o que resulta no consumo anual de 1542,08 MWh.

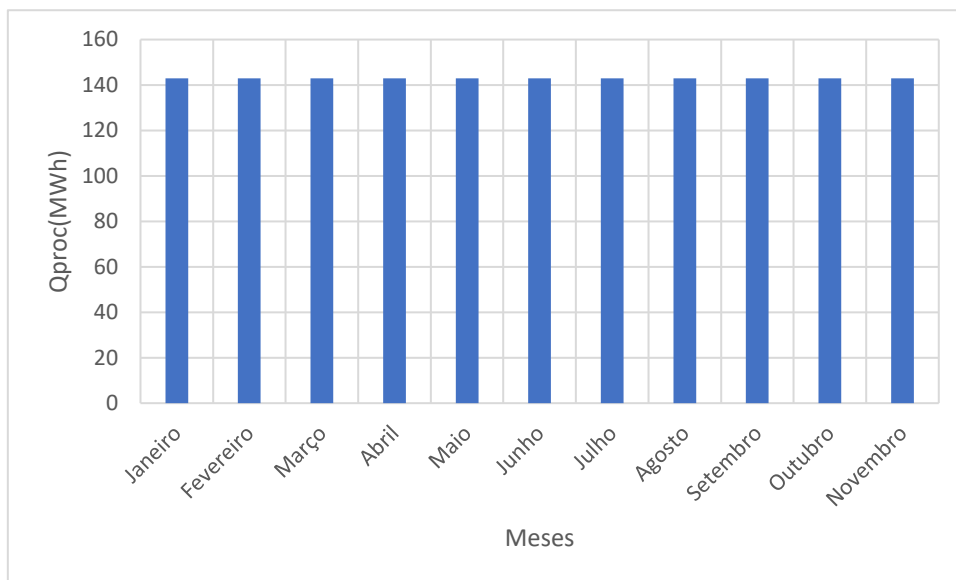


Figura 22 Consumo mensal do processo industrial.

O sistema solar proposto neste trabalho não considera armazenamento de energia térmica e não conseguirá satisfazer continuamente todas as necessidades térmicas do processo industrial. É por isso necessário definir como será fornecida energia nas situações em que o sistema solar térmico não corresponde às necessidades do processo industrial que não pode ser interrompido por falta de capacidade do sistema em gerar a energia requerida. Se propõe a integração de uma caldeira auxiliar alimentada a gás natural.

No separador do *software greenius* correspondente ao local do projeto é ainda necessário especificar quais os dados meteorológicos a usar para a simulação do funcionamento do sistema solar proposto. As variáveis meteorológicas relevantes são as radiações direta, global e difusa, e as

temperatura e pressão ambientes. Os dados meteorológicos para um ano típico da cidade de Évora, com resolução de 60 min, foram obtidos no *software* PVGIS [82], tendo sido transferidas para o Excel e formatadas para que o *software* greenius os aceitasse. Na figura 23 se podem observar os valores mensais médios para a irradiância normal direta (DNI – *Direct Normal Irradiance*) e a irradiância global horizontal (GHI – *Global Horizontal Irradiance*) consideradas neste trabalho para a cidade de Évora.

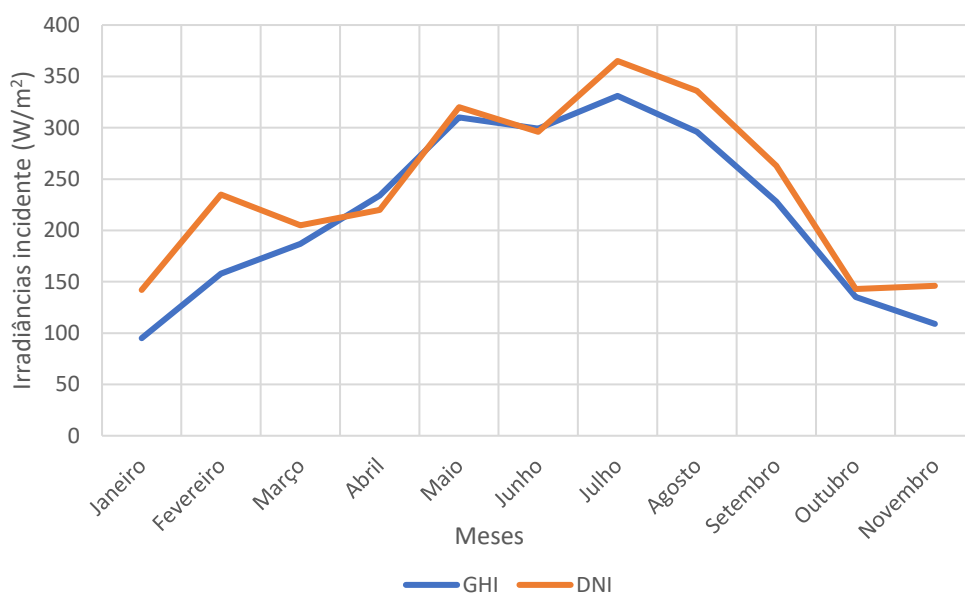


Figura 23 Irradiâncias global horizontal e normal direta para a cidade de Évora.

Como seria de esperar, os valores médios mensais das irradiâncias de verão são maiores do que no inverno, o que obviamente conduz a uma maior produção de energia pelo sistema térmico solar no verão. Na tabela 13 são apresentadas a irradiação anual global horizontal ($H_{g,H}$), direta ($H_{dir,n}$) e difusa (H_{dif}) e a temperatura média anual para a cidade de Évora.

Tabela 13 Dados anuais meteorológicos para a cidade de Évora.

$H_{g,H}$ (kWh/m²/ano)	1811,24
$H_{dir,n}$ (kWh/m²/ano)	2079,27
H_{dif} (kWh/m²/ano)	599,70
Temperatura média anual (°C)	17,01

3.3.1.1 Tecnologia

Nesse separador é necessário especificar a tecnologia escolhida para o sistema solar térmico proposto e que deverá ser adequada à gama de temperaturas requerida pelo processo industrial e ter uma boa eficiência. De seguida se passam a descrever os parâmetros a considerar para os diversos equipamentos que integram o sistema solar, nomeadamente para o coletor solar, campo solar, armazenamento térmico e caldeira.

Para a escolha do coletor se deve ter em conta as temperaturas desejadas. Como se viu no capítulo 2, todos os tipos de coletores solares têm um limite máximo de temperatura que conseguem atingir. Como as temperaturas requeridas pelo processo industrial são superiores a 200 °C, se escolheram coletores cilindro-parabólicos (PTC – *Parabolic Trough Colector*). O *software greenius* contém um banco de dados de diferentes coletores PTC e suas características. O coletor com o receptor escolhido foi o da marca Schott, modelo 2008 PTR70 que pode atingir uma temperatura de 500°C e tem uma estrutura de 148,50 m de comprimento, uma largura de abertura de 5,76 m e uma área efetiva de coletor de 817,50 m². Para o cálculo do rendimento do coletor PTC, é usada a equação 3.1 [83],

$$\eta_{col} = K \eta_{opt} \eta_{limp} - \left(K b_0 \Delta T + \frac{b_1 \Delta T + b_2 \Delta T^2 + b_3 \Delta T^3 + b_4 \Delta T^4}{DNI} \right). \quad (100), \quad 3.1$$

na qual,

η_{col} : rendimento do coletor [-];

K : fator de correção do ângulo de incidência modificado [-];

η_{opt} : rendimento ótico do coletor [-];

η_{limp} : índice de limpeza da superfície refletora [-];

b_0 : coeficiente de perdas térmicas do receptor [1/K];

b_1 : coeficiente de perdas térmicas do receptor [W/m²K];

b_2 : coeficiente de perdas térmicas do receptor [W/m²K²];

b_3 : coeficiente de perdas térmicas do receptor [W/m²K³];

b_4 : coeficiente de perdas térmicas do receptor [W/m²K⁴];

ΔT : diferença de temperatura entre a temperatura média no coletor e a temperatura ambiente [K];

DNI : irradiância normal direta [W/m²].

Para o coletor escolhido: $\eta_{opt}=0,75$, $\eta_{limp}=0,97$, $b_1=3,298 \times 10^{-2}$ W/m²K, $b_4=1,356 \times 10^{-9}$ W/m²K⁴ e os restantes fatores nulos, (valores predefinidos no *software greenius*).

Os cálculos envolvem o parâmetro K que traduz a dependência do rendimento ótico do coletor com o ângulo de incidência da radiação solar, e, portanto, a posição do Sol. Este parâmetro é cálculo pela equação 3.2 [83],

$$K = IAM \cdot \cos\theta, \quad 3.2$$

em que,

K : fator de correção do ângulo de incidência modificado [-];

IAM : modificador do ângulo de incidência [-];

θ : ângulo de incidência da radiação solar [°].

Por sua vez o modificador do ângulo de incidência (*IAM*) é calculado de acordo com a equação 3.3 [83],

$$IAM = 1 - \frac{a_1\theta + a_2\theta^2 + a_3\theta^3}{\cos\theta}, \quad 3.3$$

em que,

IAM: modificador do ângulo de incidência;

*a*₁: coeficiente de ajuste do ângulo de incidência [1/°];

*a*₂: coeficiente de ajuste do ângulo de incidência [(1/°)²];

*a*₃: coeficiente de ajuste do ângulo de incidência [(1/°)³];

θ: ângulo de incidência da radiação solar [°].

Assim, para o coletor escolhido: *a*₁= 5,25×10⁻⁴ 1/°, *a*₂= 2,86×10⁻⁵ (1/°)² e *a*₃=0.

A figura 24 apresenta os valores do rendimento do coletor escolhido para diferentes valores de irradiância normal direta e ângulo de incidência igual a zero.

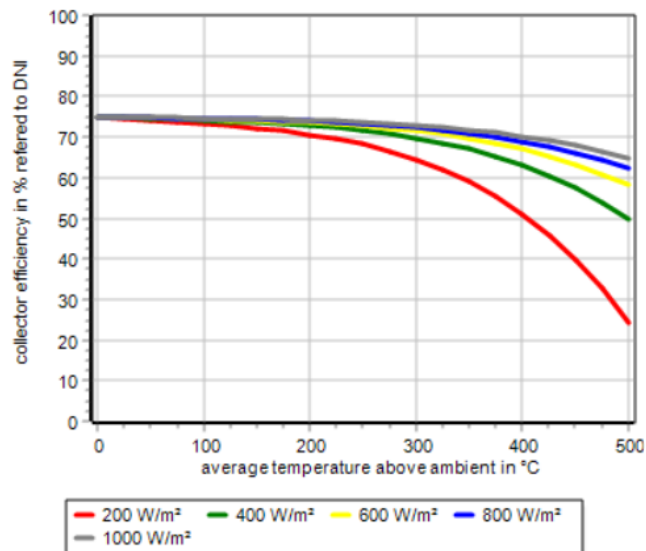


Figura 24 Rendimento do coletor com receptor Schott 2008 PTR70 para diferentes valores de DNI e ângulo de incidência de 0° (fonte: [83]).

Para além da escolha do coletor, no projeto do sistema solar é necessário definir as dimensões do campo solar e tubulações, bem como o fluido de transferência de calor e os parâmetros de operação do campo solar. O dimensionamento do campo solar tem muita importância na avaliação do desempenho do sistema, pois é através dele que se conseguem analisar parâmetros como o sobredimensionamento do sistema ou o não fornecimento de energia térmica necessária ao processo, que têm uma grande relevância em termos de viabilidade económica.

No projeto do sistema solar proposto foram considerados dois casos distintos: utilização de apenas um coletor solar e de dois coletores. Através da análise do comportamento desses dois sistemas apresentada no próximo capítulo, se procurará avaliar qual apresenta melhor desempenho e que melhor se adequa à demanda de calor do processo industrial em causa.

Com a eficiência do coletor solar térmico calculada como descrito anteriormente e especificando uma área para o campo solar e uma irradiância normal direta de referência, o *software* greenius estima a produção nominal do sistema solar térmico proposto para uma temperatura ambiente igual a 25 °C. Para especificar o valor da DNI de referência foi escolhido o dia 30 de novembro, tendo sido feitos cálculo da média do dia, sendo determinado o valor de

713,98 W/m². Estas estimativas servem apenas de referência e ajudam no dimensionamento do campo solar, comparando a produção nominal do sistema proposto com as necessidades de aquecimento requeridas pelo processo de produção de biodiesel.

Para uma exposição solar máxima, se considerou que os coletores têm uma orientação Norte-Sul em relação ao azimute de 0° para uma maior eficiência na captura de energia solar ao longo de todo o ano. O dimensionamento do campo solar será discutido no próximo capítulo no que diz respeito à quantidade de coletores considerada de modo a se conseguir uma maior produção de energia térmica anual e um melhor desempenho econômico.

Outra das especificações que é feita no separador do *software* greenius referente à tecnologia é a do fluido de transferência de calor. Este foi escolhido de modo que se adequasse a uma temperatura de saída dos coletores superior a 208 °C e que tivesse propriedades químicas que conduzissem a um bom comportamento do sistema solar térmico. Desse modo à temperatura nominal de entrada dos coletores foi atribuído 100°C e à temperatura nominal de saída dos coletores 230° C. Para o fluido de transferência de calor se optou por óleos térmicos, já que estes possuem um elevado ponto de ebulição, operam numa ampla faixa de temperaturas, possuem uma baixa viscosidade, com vantagens no bombeamento, e têm excelentes características térmicas [6]. Alguns dos óleos térmicos presentes no banco de dados do *software* greenius são o Dowtherm, Syltherm, Therminol, entre outros. O fluido térmico escolhido foi o Therminol VP-1, um óleo sintético com propriedades compatíveis com as necessidades do processo que requer temperaturas de 208°C, já que pode operar até uma temperatura de 400°C, e apresenta uma elevada eficiência na transferência de calor. Para além disso, uma sua característica importante para o meio ambiente e o de ser um fluido biodegradável, tornando-o uma opção mais interessante do ponto de vista de proteção ambiental [84]. A tabela 14 apresenta algumas das características do fluido de transferência de calor escolhido.

Tabela 14 Características do fluido Therminol VP-1 [84].

Temperatura mínima de trabalho (°C)	12
Temperatura máxima de trabalho (°C)	400
Massa volúmica a 230 °C (kg/m³)	886

Outra das escolhas que é necessário fazer é a de como o sistema solar térmico responde quando a quantidade de calor que os coletores geram não permite satisfazer as necessidades requeridas pelo processo. Se considerou nesses casos que o calor seria gerado por uma caldeira alimentada a gás natural com uma potência nominal de 513 kW_t para que possa satisfazer na integra a carga requerida pelo projeto, se necessário. Se considerou que a eficiência dessa caldeira, 85%, é a de uma caldeira a gás natural instalada num sistema solar térmico existente [85].

De referir por último, que se optou por não considerar armazenamento térmico, já que a necessidade de calor de processo da usina de biodiesel são essencialmente no período de horas de Sol. Se reduz assim a complexidade do sistema solar térmico, bem como os custos associados ao armazenamento de energia térmica.

3.3.1.2 Economia

Os projetos solares térmicos para calor de processo existentes têm elevados custos de investimento. Assim, a decisão de investir nesse tipo de sistemas deve ser bem ponderada, analisando cuidadosamente os custos associados ao projeto e calculando e ponderando indicadores de desempenho económico. Apesar do *software* greenius fazer a análise de investimentos em sistemas de energia solar térmica, se optou por fazer essa análise no Excel, se tendo utilizado os valores de produção de calor calculados através da simulação com o *software* greenius.

Para a análise da viabilidade económica do sistema solar proposto é necessário estimar os custos associados ao investimento no sistema solar térmico, vulgarmente referidos como CAPEX (acrónimo que significa *Capital*

Expenditure). Esses custos se referem aos coletores solares, tubulação, fluido térmico, projeto, comissões existente e licenças entre outros. Sendo o CAPEX muito dependente das características específicas do sistema a implementar e sua localização e sendo difíceis de encontrar valores de referência na literatura, se consideraram os custos específicos reportados no banco de dados SHIP para sistemas solares térmicos para fornecimento de calor de processo instalados na Europa e já apresentados no capítulo 2. Assim, para o investimento no sistema solar proposto se utilizou a mediana dos custos de investimento em sistemas solares térmicos com coletores cilindro-parabólicos (488 €/m²) [52]. A partir do custo específico, é possível determinar o custo de instalação do sistema solar utilizando a seguinte fórmula:

$$\text{CAPEX} = c_{\text{esp}} \cdot A_{\text{ref}} \quad (3.4)$$

Em que,

CAPEX: custo de investimento [€];

c_{esp} : custo específico do investimento [€/m²];

A_{ref} : área refletora do campo solar [m²].

A tabela 15 mostra os valores obtidos para as duas opções de sistema solar térmico propostas neste trabalho (um campo solar utilizando apenas um coletor e outro considerando dois coletores).

Tabela 15 Custos de instalação para as duas opções de sistema solar térmico propostas neste trabalho.

Sistema	CAPEX (€)	c_{esp} (€/m²)	A_{ref} (m²)
1 Coletor	399 184,00	488	818
2 Coletores	796 368,00	488	1636

Para avaliar o investimento nas duas opções para o sistema solar térmico proposto é também necessário considerar os custos de operação e manutenção dos referidos sistemas, vulgarmente referidos como OPEX (acrónimo que significa *Operation Expenditures*).

De acordo com [86], os valores de OPEX para sistemas solares térmicos para calor de processo podem variar entre 4 €/kW_t e 10 €/kW_t (que pode ser convertido num custo específico expresso em €/m²) [86]. Na análise efetuada se assumiu o valor de 6,50 €/kW_t para o OPEX, que, utilizando a potência instalada por unidade de área, corresponde a um custo específico de operações e manutenção de 4 €/m².

No dimensionamento do projeto se considerou a instalação de uma caldeira auxiliar, como já citado acima, cujo valor monetário é 217 623 €. Durante a vida útil da caldeira é necessário ter em conta os custos associados à manutenção da caldeira, para além dos gastos com o combustível [85]. Foram considerados para os custos associados à manutenção da caldeira 1% do valor do investimento [85]. Para o custo associado à compra do gás natural foi considerado o valor do gás natural para consumo industrial apresentado pelo Eurostat [87], no valor 0,0871 €/kWh com o adicional do IVA do país (6% em Portugal) [88]. O custo futuro do combustível foi atualizado de acordo com a média das inflações ao decorrer dos anos [87]. Para uma estimativa do preço de venda de calor foram considerados valores de referência fornecidos pela EDP [89], se tendo escolhido o valor de 0,16 €/kWh_t. Para investigar e comparar o desempenho económico dos sistemas solares propostos com um sistema de produção de energia térmica não renovável, foi realizada uma simulação com um sistema cujo calor é totalmente gerado por uma caldeira a gás natural. Neste caso, se utilizaram os valores indicados acima para o custo da caldeira a gás e sua manutenção, assim como para o preço do gás natural.

3.4 Indicadores de Desempenho Técnico e Econômico do Projeto

Através do cálculo e comparação de indicadores de desempenho técnico e econômico se pode avaliar técnica e economicamente os sistemas de energia solar térmicos. De seguida se descrevem os indicadores usados neste trabalho.

3.4.1 Indicadores de Desempenho Técnico

Pode se definir o **rendimento do sistema solar térmico** proposto neste trabalho como a razão entre a energia térmica fornecida pelo campo de coletores ao processo de produção de biodiesel e a energia solar normal que chega à superfície dos coletores solares (sem perdas). O rendimento do sistema solar pode ser escrito pela seguinte equação:

$$\eta_s = \frac{Q_{ss,útil}}{Q_f} \times 100 \quad (3.5)$$

Na qual,

η_s : rendimento do sistema solar térmico [%];

$Q_{ss,útil}$: energia térmica fornecida anualmente ao processo industrial pelos coletores solares [kWh/ano];

Q_f : irradiação solar normal incidente anualmente nos coletores solares [kWh/ano].

Para o cálculo da energia solar incidente normalmente em uma determinada área de coletores durante um determinado tempo, se usa a seguinte equação:

$$Q_f = I_{\text{dir},n} \cdot A_{\text{rp}} \cdot \Delta t \quad (3.6)$$

Na qual,

$I_{\text{dir},n}$: irradiância direta normal incidente aos coletores [W/m^2];

A_{rp} : área dos refletores primários [m^2];

Δt : intervalo de tempo [s].

O valor de Q_f pode ser interpretado como o recurso solar teórico utilizável por coletores solares de seguimento ideal sem quaisquer perdas.

Uma das medidas indicativas mais comumente usadas em projetos de sistemas solares térmicos é a **fração solar**. Este parâmetro representa a razão entre a energia térmica fornecida pelos coletores solares ao processo e a energia térmica necessária para atender a demanda do processo industrial [6].

$$f_{\text{solar}} = \frac{Q_{\text{ss},\text{útil}}}{Q_{\text{proc}}} \times 100 \quad (3.7)$$

Em que,

f_{solar} : fração solar [%];

$Q_{\text{ss},\text{útil}}$: energia térmica fornecida anualmente ao processo industrial pelos coletores solares [kWh/ano];

Q_{proc} : demanda anual de energia térmica pelo processo industrial [kWh/ano].

A **razão de calor solar útil** é uma medida que avalia o aproveitamento do calor fornecido pelo sistema solar térmico, ou seja, que contabiliza o calor solar útil do sistema em relação ao calor fornecido pelo campo solar. É um parâmetro

indicativo para verificar se ocorre sobredimensionamento do campo solar e é definido por:

$$R_{\text{útil}} = \frac{Q_{\text{ss,útil}}}{Q_{\text{out}}} \times 100 \quad (3.7)$$

Em que,

$R_{\text{útil}}$: razão de calor solar útil [%];

$Q_{\text{ss,útil}}$: calor solar útil fornecido anualmente ao processo industrial [kWh/ano];

Q_{out} : calor fornecido anualmente pelo campo de coletores [kWh/ano].

A razão de calor útil é um indicador que ajuda a comparar diferentes tecnologias e diferentes sistemas solares, sendo o valor Q_{out} referente ao calor fornecido pelo campo de coletores ao processo industrial mais o calor solar não aproveitado.

3.4.2 Indicadores de Desempenho Econômico

Os custos associados à produção de energia são relevantes e significativos na análise da viabilidade econômica de um projeto de um sistema solar térmico. Uma forma cada vez mais utilizada para comparar diferentes sistemas de produção de energia térmica é através da análise dos custos nivelados de calor que distribui todos os custos do projeto ao longo da sua vida. O **custo nivelado de calor**, medida baseada no conceito de custo nivelado de energia amplamente difundido no setor de energia elétrica, pode ser calculado pela seguinte fórmula [90]:

$$LCOH = \frac{CAPEX + \sum_{n=1}^T \left[\frac{OPEX}{(1+i)^n} \right]}{\sum_{n=1}^T \left[\frac{Q_{\text{proc}}}{(1+i)^n} \right]} \quad (3.8)$$

Em que,

LCOH: custo nivelado de calor [€/kWh];

CAPEX: investimento inicial do sistema solar térmico [€];

OPEX: custos anuais associados à operação e manutenção do sistema solar térmico [€];

Q_{proc} : calor consumido anualmente pelo processo industrial [kWh/ano];

i : taxa de desconto [-];

T: tempo de vida do sistema solar térmico [anos].

Neste trabalho se considerou que a taxa de desconto é 5% e o tempo de vida do sistema solar térmico 25 anos. Como receitas do projeto, se contabilizou o custo evitado de compra de energia térmica. Se considerou que o custo da energia térmica é 0,16 €/kWh [89].

Para além do custo nivelado de calor, se calculou o **período de retorno do investimento**, ou seja, o período de tempo necessário para que as receitas obtidas pela operação do sistema solar igualem as despesas anuais e de investimento. Para determinar o período de retorno, se utiliza a seguinte fórmula:

$$0 = -\text{CAPEX} + \sum_{n=1}^{\text{PR}} \left[\frac{\text{Receitas} - \text{OPEX}}{(1+i)^n} \right] \quad (3.9)$$

Em que,

PR: período de retorno do investimento [anos];

CAPEX: investimento inicial do sistema solar térmico [€];

Receitas: receitas anuais associadas ao projeto [€];

OPEX: custos anuais associados à operação e manutenção do sistema solar térmico [€];

i : taxa de desconto [-].

4

Resultados

4. Resultados

Neste capítulo serão primeiramente apresentados os resultados da análise de viabilidade técnico-económica do sistema solar térmico proposto no capítulo anterior. Para essa análise se utilizou, como descrito no capítulo anterior, o *software* greenius e uma folha de cálculo desenvolvida neste trabalho. Seguidamente, se apresenta uma análise mais detalhada das simulações do sistema solar proposto efetuada com recurso ao *software* greenius.

4.1 Análise da Viabilidade Técnico-económica do Sistema Proposto

Como referido no capítulo 3, o sistema solar térmico de concentração proposto neste estudo deverá ser capaz de satisfazer uma carga de 513 kW_t para a produção de biodiesel a partir de 1000 kg/h de óleo de colza. Se consideraram duas opções para o sistema solar térmico: uma com um coletor cilindro-parabólico com receptor (Schott 2008 PTR70) com uma área efetiva de coletor de 817,50 m² e outra com dois desses coletores colocados em série, e, portanto, com o dobro da área refletora. A tabela 16 apresenta algumas características dos dois sistemas.

Tabela 16 Características das duas opções para o sistema solar térmico analisado.

	1 Coletor	2 Coletores
Nº de coletores	1	2
Nº de loops	1	1
Área coletora (m²)	817,5	1635
Potencia nominal da caldeira (kW_t)	513	513
Eficiência da caldeira (%)	85	85

- **Razão de calor útil e fração solar**

A simulação realizada com recurso ao *software* greenius permite determinar a fração solar e a razão de calor útil do sistema solar proposto ao

longo de um ano meteorológico típico. Os resultados mensais para esses dois parâmetros quando se considera apenas um coletor solar podem ser observados na figura 25.

- Sistema solar com um coletor

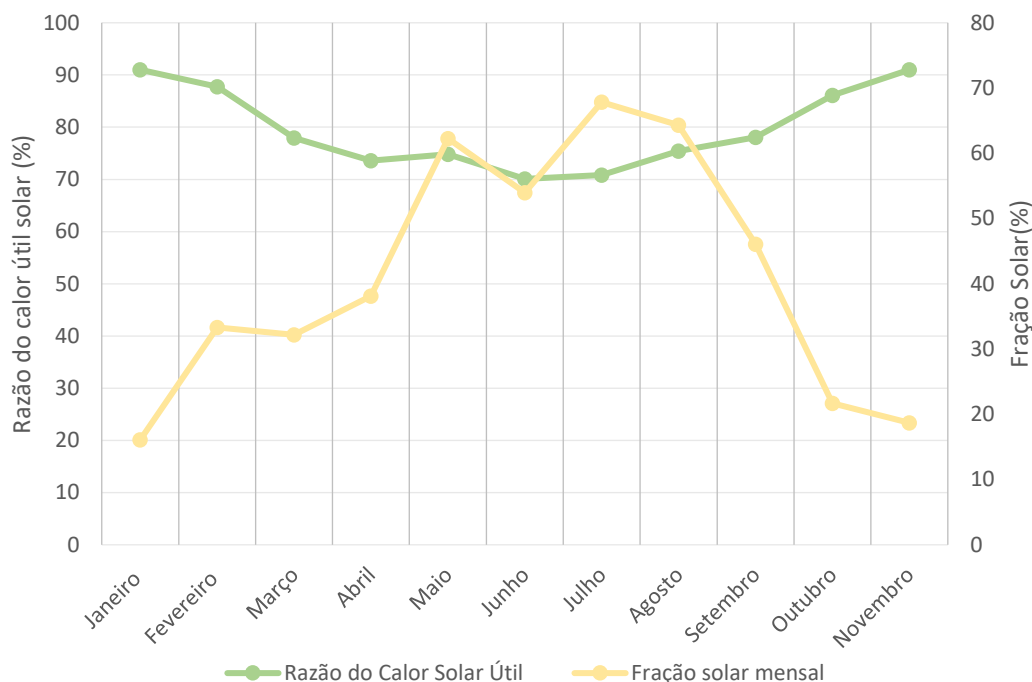


Figura 25 Fração solar e razão de calor útil mensal do sistema solar ao longo de um ano para um coletor.

O comportamento das curvas dos sistemas são como o esperado, a fração solar é maior durante a primavera e verão, já que nessas estações do ano a irradiância solar é superior (figura 25). É em julho que a fração solar é máxima, atingindo um valor de 67,8%, sendo mínima em janeiro (16%). Se verifica que no mês de junho ocorre um decréscimo da fração solar em relação ao mês de maio. Esse decréscimo deve ao decréscimo da irradiância solar (figura 23). Contrariamente à fração solar, a figura 25 apresenta uma redução da razão de calor útil do sistema solar nos meses de primavera e verão, o que indicia um maior desperdício da energia solar fornecida pelo sistema solar térmico por esta, em determinadas condições, exceder as necessidades de energia térmica do

processo industrial. O gráfico também demonstra, geralmente, um bom fornecimento de calor dos coletores solares para o processo com elevados valores de fração solar e razão de calor útil. No entanto, em média, as necessidades de energia térmica mensais por parte do processo de produção de biodiesel são sempre superiores ao que o campo solar com um coletor pode fornecer, se necessitando sempre do auxílio da caldeira a gás natural.

A apresenta figura 26 valores mensais para a energia térmica fornecida pelo campo de coletores ($Q_{ss, \text{útil}}$, calor solar útil) e pela caldeira (Q_{boiler}) ao processo, a energia solar total que é fornecida ao sistema solar (Q_{out}), a energia solar utilizável por coletores solares de seguimento ideal sem quaisquer perdas (Q_f) e a energia requerida pelo processo (Q_{proc}). Se refira que uma parte da energia solar fornecida (Q_{out}) é efetivamente entregue e consumida pelo processo industrial ($Q_{ss, \text{útil}}$) enquanto outra é desperdiçada, por o consumo de energia pelo processo ser inferior à energia térmica fornecida pelo sistema solar térmico. Adicionalmente, $Q_{ss, \text{útil}} + Q_{\text{boiler}} = Q_{\text{proc}}$.

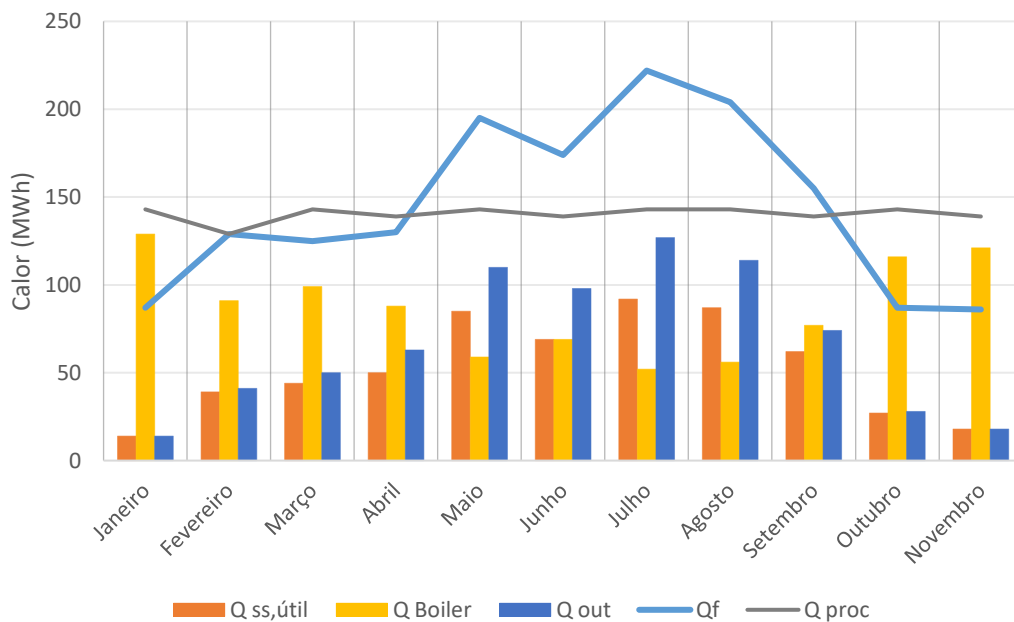


Figura 26 Variação mensal do calor solar útil, calor fornecido pela caldeira, calor térmico fornecido pelo sistema solar, energia solar disponível para um coletor e da energia térmica consumida pelo processo.

A figura 26 mostra que nos meses de maio a agosto se tem uma maior produção de energia solar, sendo a máxima energia térmica produzida pelo coletor solar igual a 127 MWh em julho (desta energia 92 MWh são consumidos pelo processo e 35 MWh são desperdiçados). Em contrapartida, nos meses de outubro a março se tem uma maior produção de energia térmica pela caldeira a gás natural, já que o coletor solar fornece menos energia. O maior valor de energia térmica produzida pela caldeira se verifica no mês de janeiro (129 MWh), sendo a energia fornecida ao processo industrial quase toda produzida pelo sistema auxiliar.

- Sistema solar com dois coletores

A figura 27 apresenta os valores mensais de fração solar e razão de calor útil do sistema solar quando este é composto por dois coletores solares (dobro do caso analisado anteriormente).

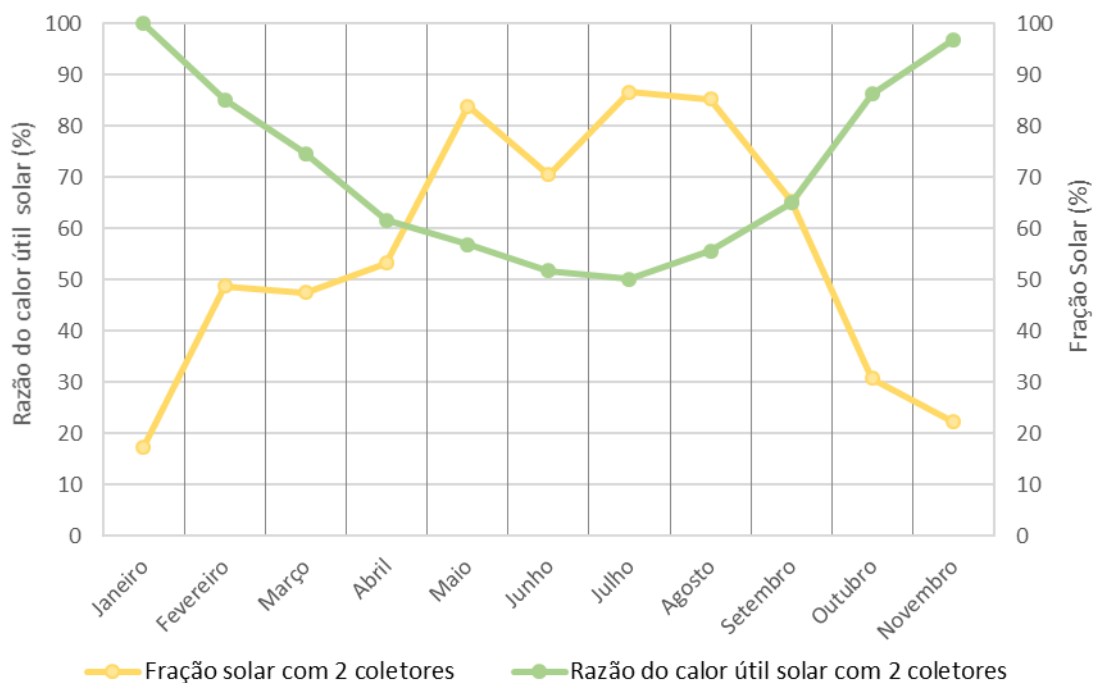


Figura 27 Fração solar e razão de calor útil mensal do sistema solar ao longo de um ano para dois coletores.

A figura 27 revela que o sistema solar com dois coletores apresenta um comportamento ao longo do ano semelhante ao do sistema solar com apenas um coletor solar. No entanto, quando se consideram o dobro dos coletores, o sistema fornece, como seria de esperar, globalmente mais energia solar térmica. A máxima fração solar se verifica no mês de julho e apresenta um valor de 86%, ou seja, nesse mês, em média, 87% das necessidades energéticas do processo são satisfeitas com recurso a energia solar (enquanto com um coletor apenas, a fração solar mensal máxima se verifica em julho, quando 68% das necessidades do processo seriam satisfeitas pelo coletor solar). É em janeiro que o sistema solar com dois coletores fornece menos energia ao processo, com uma fração solar de 17% sendo uma percentagem parecida com o sistema de apenas um coletor que apresenta 16%.

Como é possível observar, a razão de calor útil aumenta após os meses de verão, uma vez que nos meses desta estação do ano, a produção de energia solar térmica é muito elevada e existe mais desperdício de energia térmica obtida a partir da energia solar. A figura 28 mostra a variação mensal do calor solar útil, da energia térmica fornecida pelo sistema solar e pela caldeira ao processo, da energia térmica consumida pelo processo e da energia solar disponível para dois coletores.

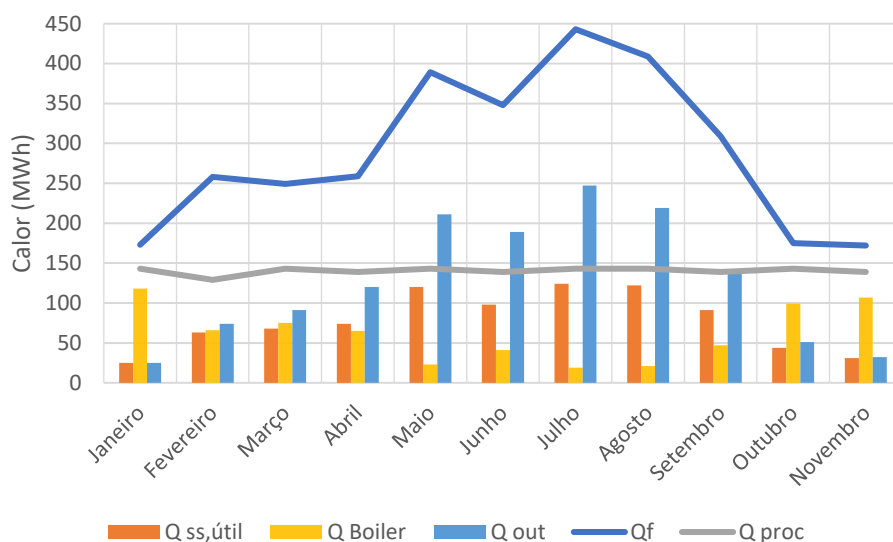


Figura 28 Variação mensal do calor solar útil, da energia térmica fornecida pelo sistema solar e pela caldeira, da energia térmica consumida pelo processo e da energia solar disponível para dois coletores.

É também possível observar (figura 28) que nos meses de verão a energia solar fornecida é mais elevada dos que nos restantes meses do ano. A produção de energia solar térmica atinge seu valor mais elevado no mês de julho, com uma produção de 247 MWh, sendo também neste mês que maior quantidade de energia solar é entregue ao processo (124 MWh). A partir da figura 28 se pode analisar que quando o campo solar é maior, a necessidade de calor auxiliar (da caldeira) é menor. Assim, o fornecimento de calor pela caldeira adicional (gás natural) é mais necessário nos meses de inverno, sendo o valor máximo de calor necessário de 118 MWh, atingido no mês de janeiro.

- **Análise económica**

A análise económica do projeto foi realizada recorrendo a uma folha de cálculo desenvolvida neste trabalho, com o auxílio do *software* greenius para a análise energética do sistema solar, para a qual foi realizada uma simulação do sistema solar térmico proposto. Todos os pressupostos usados nos cálculos dos indicadores de desempenho econômico foram apresentados nos capítulos 2 e 3.

Para o cálculo do custo nivelado de calor (LCOH) foi necessário conhecer os custos de investimento em sistemas solares térmicos com coletores cilindro-parabólicos para calor de processo. Considerando o custo específico deste tipo de sistema determinado e apresentado no capítulo 2 (488€/m²), se obtêm os valores de investimento do sistema solar térmico para os dois cenários considerados neste trabalho (tabela 17).

Tabela 17 Custos do sistema solar térmico para os dois cenários analisados.

	Custo específico (€/m²)	Área do campo solar (m²)	Custo total (€)
CAPEX	488	817,5	398 940
	488	1635	797 880
OPEX	4	817,5	3 270
	4	1635	6 540

A tabela 17 também apresenta os valores dos custos de operação e manutenção anuais do sistema solar térmico. Para além destes custos foram ainda considerados os custos de compra do gás natural para o sistema auxiliar.

A figura 29 apresenta os indicadores de desempenho econômicos considerados neste trabalho para as duas variantes de sistema solar propostas e diferentes valores de custos de investimento específico (valor mínimo, máximo, e mediana do banco de dados SHIP (tabela 2)).

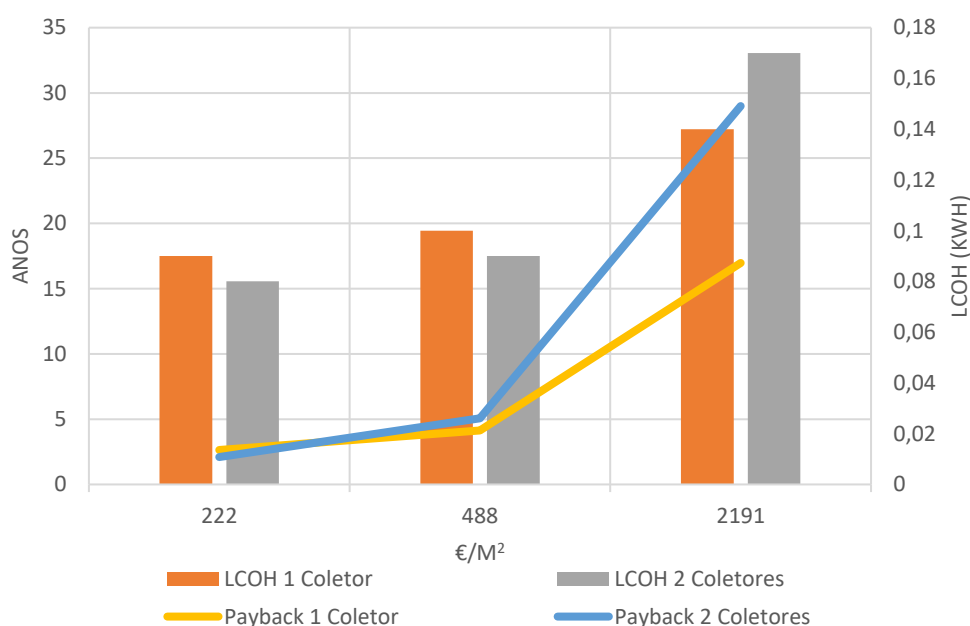


Figura 29 Valores de LCOH e período de retorno em função do custo de investimento específico para o sistema solar proposto.

Os valores dos indicadores econômicos obtidos para o sistema com um coletor, considerando um custo de investimento específico de 488 €/m², foram: LCOH = 0,10 €/kWh, PR = 4,1 anos, enquanto para o sistema com dois coletores, os resultados foram: LCOH = 0,09 €/kWh, PR = 5,1 anos. Se verifica que o sistema com dois coletores cilindro-parabólicos é mais dispendioso do que com um coletor, pois a sua área do campo é o dobro. Isso conduz a um período de retorno ligeiramente superior ao do sistema com um coletor apenas. No entanto, o valor do LCOH para a opção com dois coletores é um pouco menor. Deste modo, caso haja disponibilidade de investimento, o sistema solar térmico que

apresenta uma maior rentabilidade será o que integra dois coletores. No entanto seu período de retorno é um pouco maior, como já referido. Como seria de esperar, se se utilizar o valor mínimo do custo específico do banco de dados SHIP, o período de retorno e o LCOH se reduzem, respetivamente, para 2,64 anos para o sistema com um coletor 2,1 anos para o sistema com 2 coletores e o LCOH de 0,09 e 0,08 €/kWh respetivamente. Por outro lado, quando se utiliza o valor máximo do custo específico do banco de dados SHIP, para o cenário de 1 coletor tem um período de retorno de 16,9 anos e um LCOH de 0,14 €/kWh, e no cenário com 2 coletores o investimento não é viável (período de retorno superior ao tempo de vida útil do sistema solar térmico) e o valor do LCOH é elevado (0,17 €/kWh).

Para contextualizar os valores apresentados no parágrafo anterior, se calculou também a viabilidade económica de implementar um sistema em que a totalidade da energia fornecida ao processo seria baseada na combustão de gás natural com os mesmos princípios de período de funcionamento do sistema solar. Assim, se considerou para os cálculos económicos, os valores da compra de uma caldeira a gás, e compra do gás natural, com valores de compra iguais aos valores do sistema térmico solar (na componente de calor auxiliar). Nessas condições de operação se obtiveram os seguintes indicadores: LCOH = 0,05 €/kWh, PR= 4,0 anos. Se verifica que o sistema de fornecimento de calor baseado em gás natural tem um menor custo de investimento, logo um menor período de retorno. No entanto, a diferença neste último indicador é relativamente pequena.

Os resultados obtidos neste estudo demonstram que, dependendo dos pressupostos definidos, os projetos de sistemas de energia solar térmica para fornecimento de calor de processo podem ser competitivos quando comparados com projetos baseados em combustíveis fósseis. Essa conclusão é tão mais verdadeira, quanto maiores forem os custos dos combustíveis fósseis.

4.2 Análise Detalhada das Simulações do Sistema Proposto

Este subcapítulo tem como objetivo apresentar resultados mais detalhados da simulação do fornecimento de energia térmica ao processo de

produção de biodiesel pelo sistema solar térmico proposto. Neste estudo foram analisados os dois cenários previstos anteriormente: um cenário com apenas um coletor e outro com dois coletores colocados em série.

A tabela 18, mostra os resultados anuais para as duas opções para o sistema solar térmico (com um e com dois coletores).

Tabela 18 Resultados anuais para os dois cenários analisados.

	1 coletor	2 coletores
$H_{dir,n}$ (kWh/m²/ano)	2079,27	2079,27
Calor solar fornecido (MWh/ano)	753,65	1434,56
Calor solar útil (MWh/ano)	585,91	859,54
Calor fornecido pela caldeira (MWh/ano)	956,16	682,534
Calor fornecido ao processo (MWh/ano)	1542,08	1542,08
η_{solar} (%)	34	25
Razão de calor solar útil (%)	77	59
Fração solar (%)	37	55

Com base nos dados obtidos, se verifica que o cenário com dois coletores apresenta uma fração solar anual acima de 40%. De acordo com Aguiar e Coelho [91], esse parâmetro deverá apresentar um valor de 40% a 90% para que o sistema não esteja nem subdimensionado nem sobredimensionado. Assim, se escolheria o sistema com dois coletores que permite satisfazer anualmente maior percentagem do calor de processo com recurso a energia solar (55%), resultando num custo nivelado de calor mais baixo (figura 28). No entanto, essas vantagens são conseguidas à custo de uma menor razão de calor útil e, portanto, de um maior desperdício de energia solar. Na tabela 18, é possível verificar a produção de energia térmica solar anual obtida com um coletor é cerca de 70% da produção de energia térmica com dois coletores. Este resultado poderá ser explicado devido a uma redução da área do campo solar em cerca de 50%. Assim, com apenas um coletor (com uma fração solar anual de 37%) se torna necessário obter mais calor a partir de uma caldeira, tendo esta uma contribuição significativa para o suprimento de energia térmica. Em ambos os sistemas

térmicos, os rendimentos dos campos solares são de 34% (com apenas um coletor) e de 25% (com dois coletores).

- **Análise horária**

A análise do comportamento diário das duas opções para o sistema solar proposto que irá ser apresentada de seguida ajuda a compreender as condições de radiação solar variáveis que ocorrem ao longo do dia e a otimizar o desempenho dos sistemas solares. Para esta análise foi considerado o dia 30 de novembro para caracterizar o período do ano com pouca radiação solar (já escolhido no capítulo 3 para a análise preliminar de dimensionamento do sistema solar). Este é o último dia de laboração da usina de produção de biodiesel antes da sua paragem para manutenção. Para a análise do sistema no verão se considerou o dia 21 de julho.

- Sistema com um coletor num dia 30 de novembro

A figura 30 apresenta, para o dia 30 de novembro, valores médios horários para a energia térmica fornecida ao processo pelo coletor cilindro-parabólico e pela caldeira, a energia solar total fornecida pelo sistema solar, a energia solar utilizável e a energia requerida pelo processo.

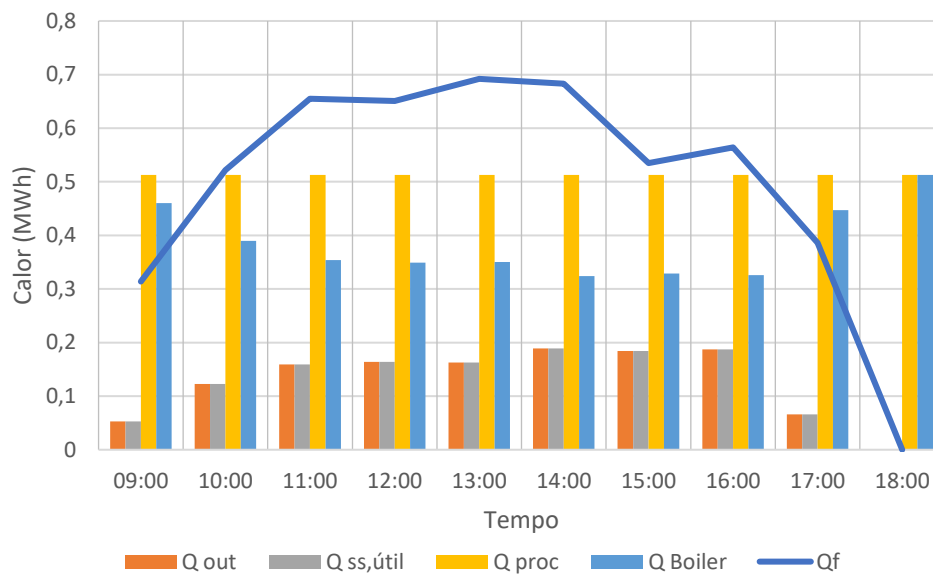


Figura 30 Variação horária da energia térmica fornecida pelo coletor solar, do calor solar útil, da energia térmica consumida pelo processo, do calor fornecido pela caldeira e da energia solar disponível para um coletor no dia 30 de novembro.

- Sistema com um coletor num dia de verão

A figura 31 apresenta, para o dia 21 de julho, as mesmas variáveis apresentadas na figura anterior.

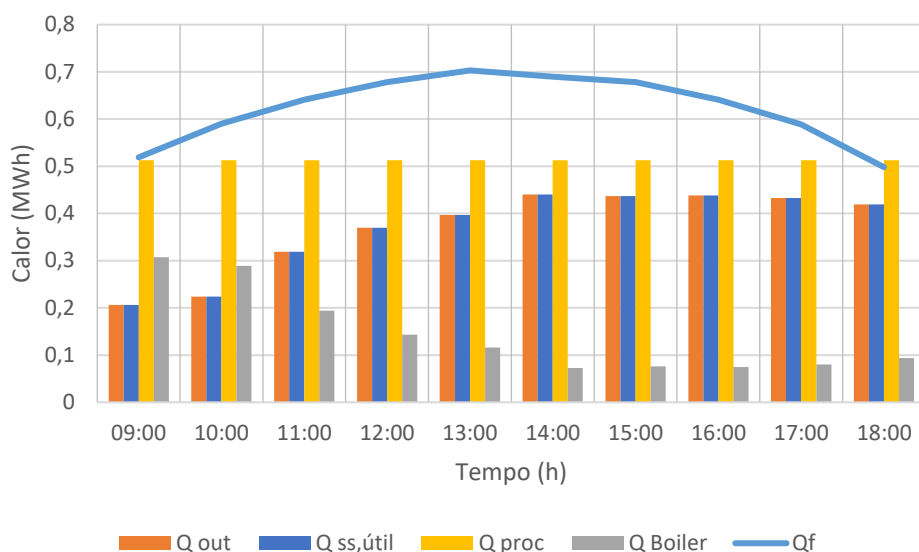


Figura 31 Variação horária da energia térmica fornecida pelo coletor solar, do calor solar útil, da energia térmica consumida pelo processo, do calor fornecido pela caldeira e da energia solar disponível para um coletor no dia 21 de julho.

Analisando as duas figuras anteriores, se verifica uma diferença significativa de energia solar disponível nos dois dias escolhidos, como seria de esperar, resultando numa diferença no fornecimento de calor solar para o sistema industrial notória. No dia 21 de julho a quantidade máxima de calor solar fornecido ao processo é 0,44 MWh, maior do que a quantidade máxima de calor solar fornecido no dia 30 de novembro (0,19 MWh). É visível o aproveitamento do calor fornecido ao processo que tem valores semelhantes ao do calor útil, não ocorrendo desperdício nesses dias. No decorrer da análise se observou uma variação significativa na produção diária de energia térmica solar. No dia 30 de novembro o sistema solar registou uma produção de 1,28 MWh refletindo condições climáticas e de radiação solar para esse período do ano. Entretanto, no dia 21 de julho a produção atingiu 3,68 MW indicando uma maior disponibilidade de radiação solar durante o verão.

As figuras 32 e figura 33 apresentam resultados equivalentes aos das e figura 30 e figura 31, mas para o sistema solar térmico composto por dois coletores cilindro-parabólicos.

- Sistema com dois coletores num dia de 30 novembro

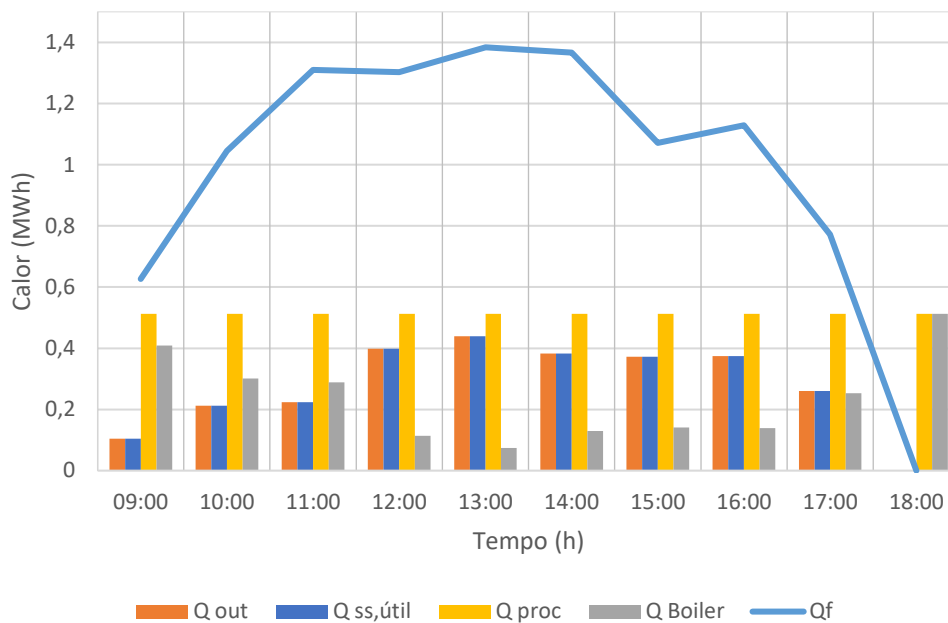


Figura 32 Variação horária da energia térmica fornecida pelo campo solar, do calor solar útil, da energia térmica consumida pelo processo, do calor fornecido pela caldeira e da energia solar disponível para dois coletores no dia 30 de novembro.

- Sistema com dois coletores num dia de verão

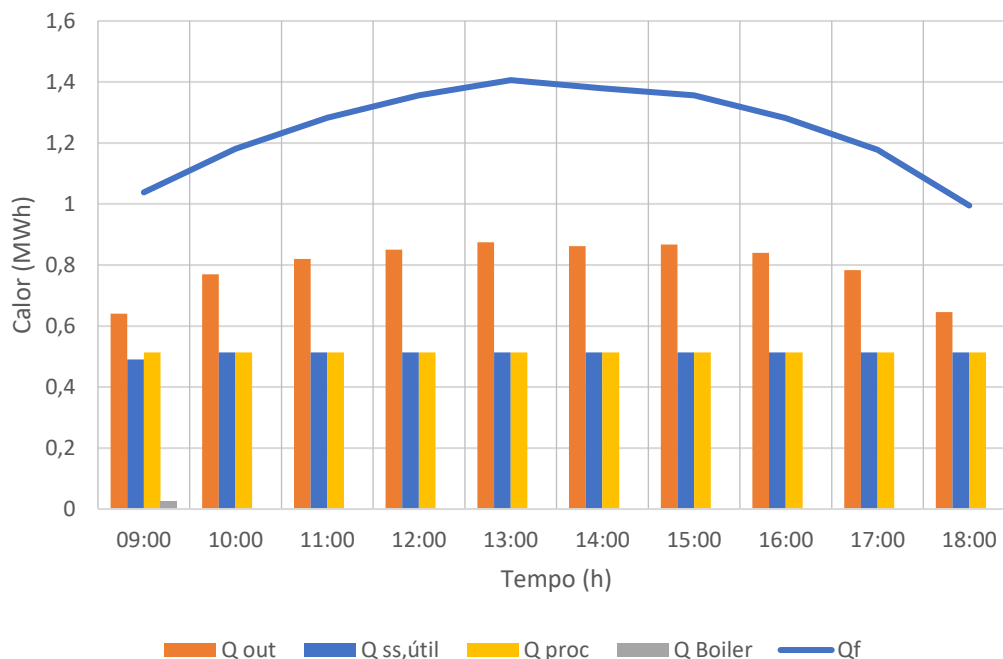


Figura 33 Variação horária da energia térmica fornecida pelo campo solar, do calor solar útil, da energia térmica consumida pelo processo, do calor fornecido pela caldeira e da energia solar disponível para dois coletores no dia 21 de julho.

Como se pode observar o comportamento do sistema com dois coletores é semelhante ao do sistema com apenas um coletor. No entanto, a energia solar disponível é maior. A diferença no calor solar fornecido para o processo industrial nos dois dias escolhidos também é notória no cenário com dois coletores. No dia 21 de julho se obteve o fornecimento de calor máximo 0,51 MWh, e no dia 30 de novembro obtivemos 0,44 MWh. Estes resultados podem ser explicados devido à influência da área do campo solar. Para um coletor solar, o máximo calor útil obtido no sistema no dia 30 de novembro foi de 0,18 MWh. Quando se consideram dois coletores, no dia 21 de julho a energia solar não é aproveitada na sua totalidade, ocorrendo um desperdício de calor solar 0,36 MWh. Este calor poderia ser aproveitado se no caso o projeto solar trabalhasse as 24 horas do processo industrial. Nesse caso, se poderia ter um sistema de armazenamento térmico e deste modo reutilizar o calor gerado em excesso durante o dia para fornecimento de energia solar ao processo industrial durante as horas em que não existe radiação solar. No dia 30 de novembro o sistema solar registou uma produção de 2,76 MWh refletindo condições climáticas e de radiação solar para

esse período do ano. Em contrapartida, no dia 21 de julho a produção atingiu 4,59 MW, totalizando quase a demanda de calor diária e demonstrando a influência da radiação solar no período de verão. As figuras 34 e figura 35 apresentam valores da temperatura média do fluido de transferência e calor solar disponível e fornecido ao processo nos dois cenários considerados no dia 21 de julho.

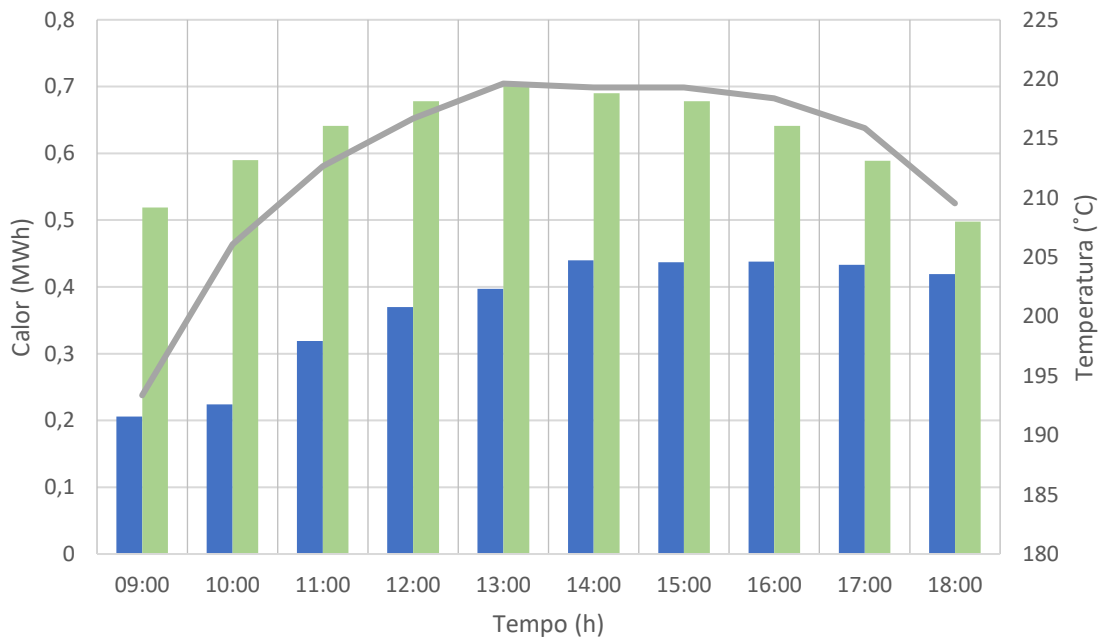


Figura 34 Variação horária da temperatura média do fluido de transferência de calor, do calor solar fornecido ao processo e da energia solar disponível no coletor no dia 21 junho para o sistema com um coletor.

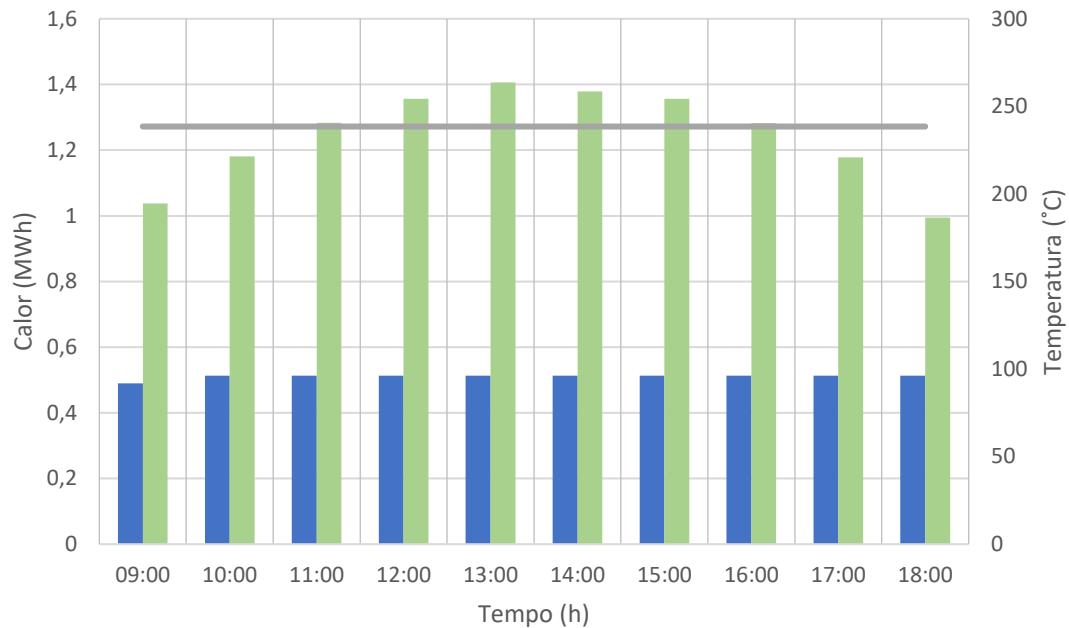


Figura 35 Variação horária da temperatura média do fluido de transferência de calor, do calor solar fornecido ao processo e da energia solar disponível no campo composto para dois coletores no dia 21 junho.

É visível no dia 21 de julho que com um coletor o comportamento da temperatura mediante o fornecimento do calor ao longo do dia em que a temperatura máxima foi 219°C, dessa maneira a temperatura de trabalho do projeto foi atendida. Avaliando o sistema com dois coletores no dia 21 de julho é notório que o calor útil fornecido foi uniforme dessa maneira a temperatura obtida foi continua com o valor 238°C.

5

Conclusão e Perspetivas de Trabalhos Futuros

5. Conclusão e Perspetivas de Trabalhos Futuros

5.1 Conclusões

O trabalho apresentado nesta dissertação de mestrado permitiu avaliar a possibilidade de integração de um sistema de obtenção de calor a partir de energia solar num processo de produção de biodiesel. A combinação da produção de biodiesel com a utilização de energia solar poderá reduzir significativamente a dependência de combustíveis fósseis e mitigar os impactos ambientais associados à produção de biodiesel.

Se utilizou o *software* DWSIM para simular o processo de produção de biodiesel a partir da injeção 1000 kg/h de óleo de colza, uma das matérias-primas mais utilizadas em Portugal para este fim. Da simulação efetuada, se conclui que a destilação que permite a recuperação do etanol e separação do biodiesel, e que é parte integrante do processo de produção de biodiesel apresentado neste trabalho, requer uma potência nominal constante de 513 kW_t entre as 9:00h e 18:00h durante 11 meses por ano. Com base na simulação do processo de produção de biodiesel, se verifica então que é necessário fornecer ao *reboiler* associado à torre de destilação 1542 MWh_t anuais a uma temperatura de 208°C.

Sendo a necessidade de calor a fornecer ao *reboiler* da torre de destilação a mais elevada no processo de produção de biodiesel simulado, se considerou que o sistema solar térmico estaria associado a essa necessidade de calor de processo. Assim, os coletores solares de concentração que permitem atingir temperaturas médias são as melhores opções tecnológicas para esta aplicação. Com base na análise dos coletores existentes, se considerou os coletores cilindro-parabólicos como os mais indicados para a obtenção do calor desejado para a produção de biodiesel.

Tendo em consideração as necessidades de calor do processo, foram propostos dois cenários: o cenário 1 com apenas um coletor com receptor (Schott 2008 PTR70) e um cenário 2 com dois coletores com receptor (Schott 2008 PTR70) colocados em série. Estes coletores com esse receptor tem um

rendimento ótico de 75%, e tendo uma range de temperatura elevada para os projetos de processos industriais.

As simulações do sistema solar térmico de concentração para fornecimento de calor de processo proposto foram realizadas recorrendo ao *software* greenius. Com base nos seus resultados, se analisou a viabilidade técnico-económica de implementação do sistema solar associado a uma usina de produção de biodiesel a implementar em Évora.

Para cada cenário foram analisados os seguintes parâmetros técnicos: calor consumido pelo processo industrial, calor solar fornecido pelo campo de coletores, calor solar útil efetivamente consumido pelo processo industrial, energia solar disponível no sistema solar, área do campo solar, temperatura média do fluido de transferência de calor, fração solar, razão de calor útil e rendimento do sistema solar. Foram também considerados os seguintes indicadores económicos para avaliar a viabilidade económica de implementação do sistema solar: CAPEX e OPEX, período de retorno e custo nivelado de calor que é um dos fatores relevantes para análise um projeto. De facto, se o valor apresentado por este último indicador for superior e distante dos valores típicos dos sistemas convencionais de calor, dificilmente será equacionada a integração do sistema solar térmico proposto.

De análise dos resultados obtidos neste estudo, é notório que o aumento do campo solar permite um aumento do calor efetivamente fornecido ao processo. No caso de apenas se considerar um coletor, a fração solar anual é 37%, subindo para 55% quando o campo solar inclui dois coletores. Quanto mais elevada for a fração solar, maior é a percentagem das necessidades de calor de processo satisfeitas a partir de energia solar. No entanto, este aumento é conseguido à custa de um maior excesso de calor produzido face à necessidade do processo de produção de biodiesel, provocando uma perda de calor. No caso do sistema solar com apenas um coletor, a razão de calor útil anual é 77%, descendo para 59% quando se dobra a área do campo solar. O resultado do estudo também apresentou um rendimento do campo solar notório, em que com apenas um coletor o sistema alcançou uma eficiência de 34% convertendo a radiação solar em energia térmica útil. A adição de um segundo coletor resultou em um rendimento de 25%. Esses números evidenciam não apenas a

viabilidade, mas também e eficácia do sistema de energia solar térmica com uma fonte sustentável.

Como seria esperar, é nos meses de verão (junho, julho e agosto) que existe maior fornecimento de calor solar para os dois sistemas solar térmicos (com um coletor e com dois coletores). Em contrapartida, nestes meses existem maiores perdas de calor solar. Uma análise de dois dias em dois períodos distintos (no período de baixa radiação solar 30 de novembro e no verão 21 de julho) permite concluir que no dia de verão considerado se tem uma produção de calor solar com um coletor de 3,68 MWh e com dois coletores um calor útil de 4,59 MWh. No primeiro caso mais da metade do consumo do processo industrial é satisfeito pelo coletor solar e no caso quase todo o calor de processo é fornecido pelos dois coletores. Por seu lado, no dia de 30 de novembro, a produção de calor solar foi de 0,18 MWh para o sistema com um coletor e 2,76 MW para o projeto com dois coletores (para um coletor o processo no dia 30 de novembro foi quase todo operado pelo calor proveniente do sistema auxiliar e para o sistema com dois coletores menos de metade do calor necessário é fornecido pela caldeira).

Para além da análise energética, foi efetuada uma análise económica do projeto de sistema solar térmico com um coletor e com dois coletores. Através da análise dos dados apresentados na plataforma SHIP, se concluiu que a mediana do custo específico de implementação de sistemas de energia solar térmica com coletores cilindro-parabólicos para fornecimento de calor de processo na Europa foi de 488 €/m². Com base neste valor, o período de retorno do sistema com um e dois coletores é, respetivamente, de 4,1 e 5,1 anos. Adicionalmente, o custo nivelado de calor para o sistema com dois coletores é de 0,09 €/kWh, enquanto com o sistema de um coletor é de 0,10 €/kWh. Foi ainda efetuada uma análise económica da opção de ter uma caldeira de gás natural a fornecer a totalidade de calor de processo (apenas para comparação). Nesse caso, o custo nivelado de calor obtido foi de 0,05 €/kWh, fazendo com que esta opção tenha um custo mais baixo do que os cenários anteriores.

Com base nos resultados obtidos, se pode concluir que o sistema que permite obter uma maior quantidade de calor a partir da energia solar e uma maior viabilidade económica é o sistema com dois coletores. No entanto, é de

salientar, que neste sistema com dois coletores ocorre uma maior perda de calor e os custos de investimento são maiores, o que poderá ser uma barreira à implementação deste tipo de sistemas. Pelo exposto, é possível concluir que a integração de um sistema solar térmico de concentração no processo de produção de biodiesel não é competitivo relativamente aos sistemas convencionais. É de salientar que a implementação de sistemas solares térmicos no processo de produção de biodiesel não só contribui para a redução das emissões dos gases com efeito estufa, mas também aumenta a eficiência energética do processo produtivo, resultando em uma produção de biodiesel mais limpa.

5.2 Perspetivas de Trabalhos Futuros

Como perspectiva de trabalho futuro seria de interesse considerar a opção de armazenamento térmico do calor solar que é desperdiçado durante períodos de alta radiação solar. E o uso de outras tecnologias de coletores solares para a investigação de um cenário mais eficiente, mais durável e mais económico

Poderia ser interessante, no futuro, substituir o gás natural fornecido à caldeira por biomassa ou glicerol, tornando assim o processo mais sustentável.

O glicerol poderia ainda ser valorizado a compostos com valor comercial elevado. Assim, o glicerol e a acetona reagem originando compostos que podem ser utilizados como bioaditivos para combustíveis. Neste sentido, e com o objetivo de tornar o processo de produção de biodiesel mais sustentável, poderia surgir uma nova unidade de produção de aditivos para combustíveis por reação do glicerol com acetona e com a integração de energia solar. Esta nova fábrica ficaria localizada próximo da unidade de produção de biodiesel, permitindo uma redução de custos de transporte.

6. Referências

- [1] Guitarrara, Paloma, “Degradação ambiente,” Brasil Escola, [Online]. Available: <https://brasilecola.uol.com.br/geografia/degradacao-ambiental.htm>. [Acedido em 03 31 2024].
- [2] A. L. Junges, V. Y. Santos e N. T. Massoni, “Efeito estufa e aquecimento global: Abordagem conceitual a partir da física para educação básica,” 23 11 2018.
- [3] S. G. Iberoamericana, “ISSUU,” Ibero-América. Alcançar A última milha. Energia acessível, confiável, sustentável e moderna., [Online]. Available: https://issuu.com/segibpdf/docs/ods7_iberamerica_2021_portuguesnuevo/s/12653628. [Acedido em 31 03 24].
- [4] M. A. S. Paixão e S. H. G. Miranda, “Um comparativo entre a política de energia renovável no Brasil e na China,” *Revista Pesquisa e Debate*, vol. 29, nº 1, pp. 50-83, 2018.
- [5] IEA, “Fornecimento de energia,” 21 12 2023. [Online]. Available: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/energy-statistics-data-browser>. . [Acedido em 27 02 24].
- [6] S. Kalogirou, “The potential of solar industrial process heat applications.,” *Applied Energy*, 2003, pp. 337-361.
- [7] EPE, Empresa de Pesquisa Energética, “Matriz Energética e Elétrica,” EPE, 21 Outubro 2023. [Online]. Available: <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>. [Acedido em 21 Outubro 2023].
- [8] PNEC, Plano Nacional Energia e Clima 2021-2030, Portugal, 2023.
- [9] DGEG, Energia em números, Portugal, 2023.
- [10] IAE, “International Energy Agency, Energy Policies od IEA Countries Portugal,” em *Solar Photovoltaic Energy, Technology Roadmap*, 2016.
- [11] REN, “REN,” 03 10 2023. [Online]. Available: <https://www.ren.pt/pt-pt/media/noticias/producao-de-energia-renovavel-bate-recorde-em-2023..> [Acedido em 17 03 2024].
- [12] I. Malico, “Biomass for industrial and district heating,” em *Gonçalves, A. C., Malico, I. (Eds.), Forest Bioenergy: From wood production to Energy use, chapter 9.*, Green Energy and Technology. Springer, Cham, pp. pp. 235-269.

- [13] C. Vannoni, R. Battisti e S. Drigo, “Potential for Solar Heat in Industrial Processes,” em *Solar Heating and Cooling Executive Committee of the International Energy Agency*, Madrid, 2008.
- [14] Energy Technology Systems Analysis Programme e International Renewable Energy Agency, “Solar Heat for Industrial Processes,” em *Solar Heat for Industrial Processes*, International Energy Agency, 2015.
- [15] ANP, Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, “Biocombustíveis,” ANP, 11 Dezembro 2020. [Online]. Available: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/qualidade-de-produtos/biocombustiveis>. [Acedido em 22 Outubro 2023].
- [16] J. Pallotta, “Biodiesel e seu impacto na economia brasileira,” Trabalho de Iniciação Científica, Faculdade Santa Rita, Novo Horizonte, Santa Catarina, Brasil, 2022.
- [17] I. Malico, “ Forest Biomass as an Energy Resource,” em *Forest Bioenergy: From Wood Production to Energy Use*, Cham: Springer International Publishing., 2024, pp. 171-207.
- [18] Cavaleiro Costa, S., Malico, I., Janeiro, F. M., Batista, A. P., Coelho, A., Lopes da Silva, T., Marques, I. P., “Dynamical modelling of biogas production supported by an experimental anaerobic digestion process.,” em *11th Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environmental Systems – SDEWES*, Lisboa Portugal, 2016.
- [19] ERSE, *Análise do mercado dos biocombustíveis 2018-2020. Entidade Reguladora dos Serviços Energético*, Entidade Reguladora dos Serviços Energético, 2021.
- [20] LNEG, “Boletim Estatístico Trimestral,” *PRODUÇÃO E IMPORTAÇÃO DE BIOCMBUSTÍVEIS E BIOGÁS*, 12 2023.
- [21] V. H. Duarte, M. H. K. Valentini, G. B. Santos, W. C. Nadaletti e B. M. Vieira, “Biocombustíveis: uma revisão sobre o panorama histórico, produção e aplicações do biodiesel,” *Meio Ambiente (Brasil)*, vol. 4, nº 2, pp. 50-68, 2022.
- [22] M. Ebadian, S. Van Dyk, J. D. McMillan and J. Saddler, “Biofuels policies that have encouraged their production and use: An international perspective,” *Energy Policy*, vol. 147, p. 111906, 2020.
- [23] A. Avinash, P. Sasikumar and A. Murugesan, “Understanding the interaction among the barriers of biodiesel production from waste cooking oil in India-an interpretive structural modeling approach,” *Renewable*, vol. 127, pp. 678-684, 2018.

- [24] S. A. Kalogirou, "Solar Energy Engineering," em *Solar Energy Engineering. Processes and Systems. 3rd Edition*, 2023.
- [25] IEA, "Energy Statistics Data Browser," [Online]. Available: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/energy-statistics-data-browser>. [Acedido em 11 03 2024].
- [26] P. C. d. S. Filho e R. R. Ferreira, "Energia solar FV- Geração de energia limpa," em *XI CONNEPI*.
- [27] R. B. Cardoso e L. A. H. Nogueira, "Estimativa dos impactos energéticos e ambientais atribuída aos coletores solares térmicos nas residências brasileiras.," 08 2011.
- [28] L. A. Scherer, M. E. D. Sessegolo, T. B. Barcarolo e M. A. R. Edler, "Fonte Alternativa de Energia: Energia solar," em *XX Seminário Interinstitucional de ensino pesquisa e extensão.*
- [29] H. H. C. Pinheiro, "Sistema Solares Fotovoltaicos Integrados à rede em instituições multi-sedes: uma abordagem técnica a parti do estudo do projeto IFRN-Solar," 06 2022.
- [30] REN21, "Energias Renováveis no Fornecimento de Energia- Concentrando Energia solar Térmica," 2023.
- [31] K. Lovegrove, J. Zapata e G. G. Nthan, "Concentrador solar térmico," 21 06 2016. [Online]. Available: <https://www.science.org.au/curious/technology-future/concentrating-solar-thermal>. [Acedido em 27 03 2024].
- [32] S. A. Kalogirou, "Solar Energy Engineering 3 Capitulo," pp. 153-184, 2009.
- [33] S. A. Kalogirou, "Chapter three, "Solar Energy Collectors," em *Energy Engineering Academic*," em *Energy Engineering Academic*, Academic Press, 2009, pp. 121-217.
- [34] J. M. O. T. d. B. Durães, "Análise do potencial da utilização de energia solar térmica em processos da indústria alimentar: extrusão de alta temperatura," Setembro 2020.
- [35] U. Jakob, A. A. Maaita e M. H. Rittmann, *Handbook for solar industrial applications at 100°C-250°C*, PU- public report, 2016.
- [36] J. Silva, "Constituição de um coletor plano com cobertura," 8 05 2011. [Online]. Available: <https://dicasesquemas.blogspot.com/2011/05/constituicao-de-um-colector-plano-com.html>. [Acedido em 19 03 2024].

- [37] NEWSOL, “Armazenamento de Energia Térmica (TES Thermal Energy Storage),” [Online]. Available: <http://www.newsol.uevora.pt/pt-pt/tecnologia-tes/>. [Acedido em 2024 03 29].
- [38] S. S. M. Seyed Soheil Mousavi Ajarostaghi, “Tecnologias de conversão de energia solar: princípios e avanços,” em *Tecnologias para Energia Solar - Térmica Usina de energia solar térmica*, 2022.
- [39] A. Vazzoler, “Fundamentos de sistemas solares térmicos,” 2021.
- [40] A. Krenzinger, C. Prieb, F. Perin e R. Haag, “Radiação Solar e Conversão Térmica da energia solar,” 2010.
- [41] F. A. Kroth, “Construção e avaliação de um concentrador solar cilíndrico parabólico para aquecimento de água residencial,” 11 2016.
- [42] Cottret, N., Menichetti, E., “Technical Study Report on Solar Heat for Industrial Processes (SHIP) State of the art in the Mediterranean region. Observatoire Méditerranéen de l’Energie: Nanterre, France.,” 2010.
- [43] P. Horta, “Process Heat Collectors: State of the Art and Available Medium Temperature Collectors. Solar Process Heat for Production and Advanced Applications.,” IEA SHC, 2015, p. 49.
- [44] J. G. Hernández e A. Sánchez-González, “Reflector Fresnel linear de feixe descendente: BDLFR,” 2019.
- [45] A. Pralon, “Coletores de Fresnel: Tecnologia solar para produção de calor, eletricidade e refrigeração,” 18 05 2013. [Online]. Available: <https://www.ofrioquevendosol.com.br/2013/05/coletores-de-fresnel-tecnologia-solar.html>. [Acedido em 15 03 2024].
- [46] Boretti, A., Castelletto, S., & Al-Zubaidy, S., “Concentrating solar power tower technology: present status and outlook,” em *Nonlinear Engineering*, pp. 8(1), 10-31.
- [47] Rioglass, “Heliostatos Facetados,” [Online]. Available: ioglass.com/es-es/productos/espejos-para-heliostatos.html. [Acedido em 15 03 2024].
- [48] B. M. Pierre Krummenacher, “Solar Process Heat for Production and Advanced Applications,” em *IEA Solar Heating & Cooling Programme and Solar Power*, IEA SHC Task 49, 2015.
- [49] Helmke, A., & Heß, S., “Classification of solar process heat system concepts,” em *Solar Process Heat for Production and Advanced Applications*, IEA, SolarPACES, 2015, pp. 61-76.
- [50] Rodrigo, R. R., Martín, R. D., Fernández, M. B., Gallego, J. Á. R., & del Río, C. M., “Technical and economic study of solar energy concentration technologies (linear Fresnel and parabolic trough collectors) to generate

process heat at medium temperature for the dairy industry of Spain.,” em *Solar Energy*, Spain, 2024, pp. 271,112420.

- [51] Energieatlas, “AEE INTEC,” 2024. [Online]. Available: <https://energieatlas.aee-intec.at/>. [Acedido em 2024 03 16].
- [52] F. M. C. Gonçalves, “Sistemas híbridos solar térmico/biomassa como alternativa para produção de calor de processo,” 2019.
- [53] S. Tayari, R. Abedi, and A. Rahi, “Comparative assessment of engine performance and emissions fueled with three different biodiesel generations,” *Renewable Energy*, vol. 147, pp. 1058-1069, 2020.
- [54] B. Brasil, “Produção do biodiesel: conheça as etapas do processo,” Biodiesel Brasil, 8 Junho 2018. [Online]. Available: <https://biodieselbrasil.com.br/producao-do-biodiesel/>. [Acedido em 6 Novembro 2023].
- [55] L. Fjerbaek, K. V. Christensen and B. Norddahl, “A review of the current state of biodiesel production using enzymatic transesterification,” *Biotechnology & Bioengineering*, vol. 102, nº 5, pp. 1298-1351, 2009.
- [56] D. Y. C. Leung, X. Wu and M. K. H Leung, “A review on biodiesel production using catalyzed transesterification,” *Applied Energy*, vol. 87, pp. 1083-1095, 2010.
- [57] P. Z. Torres, “Simulação do processo de produção de biodiesel usando etanol supercrítico,” Monografia, Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo, Lorena, São Paulo, Brasil, 2015.
- [58] Fukuda, H., Kondo, A., Noda, H., “Biodiesel fuel production by transesterification of oils,” *Journal of Bioscience and Bioengineering*, vol. 92, pp. 405-416, 2001.
- [59] Knothe, G., Gerpen, J., Krahl V., “The biodiesel handbook,” AOCS Press, 2005.
- [60] A. Demirbas, “Biodiesel from waste cooking oil via base-catalytic and supercritical methanol transesterification,” *Energy Conversion and Management*, vol. 50, nº 4, pp. 923-927, 2009.
- [61] EurObserv’ER (2023), “RES in transport barometer,” *EurObserv’ER*, 2023.
- [62] Eurostat, “Eurostat Statistics,” 2024. [Online]. Available: <https://ec.europa.eu/eurostat/>. [Acedido em 23 04 2024].
- [63] C. Europeia, “Comunicação da comissão ao parlamento europeu, ao conselho, ao comité económico e social europeu e ao comité das regiões.,” 9 12 2020. [Online]. Available: <https://eur->

lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:5e601657-3b06-11eb-b27b-01aa75ed71a1.0007.02/DOC_1&format=PDF. [Acedido em 02 04 2021].

- [64] [Online]. Available: <https://blueswandaily.com/british-airways-takes-another-major-step-along-the-path-to-sustainable-fuel-as-it-invests-in-europes-first-plant-to-turn-household-and-commercial-solid-waste-into-fuel/>. [Acedido em 10 Outubro 2023].
- [65] T. G. A. Nunes, C. R. Ungarett, G. M. R. D. Marco e M. A. A. d. Mendonça, “Financiamentos chineses de projetos de energias renováveis na América Latina: Uma análise á luz dos desafios das mudanças climáticas,” 2023.
- [66] L. Fuli e F. Yixuan, “Biofuels production and development in China,” em *IEA Bioenergy Task*, Institute of Bioenergy and Bioprocess Technology, Chinese Academy of Sciences, 2023.
- [67] Ministério de Minas e Energia, “Análise de Conjuntura dos biocombustíveis Ano 2021,” 2022.
- [68] Statista Research Department, “Statista Leading countries based on biofuel production worldwide in 2022,” 8 1 2024. [Online]. Available: <https://www.statista.com/statistics/274168/biofuel-production-in-leading-countries-in-oil-equivalent/>. [Acedido em 25 04 24].
- [69] A. Morgan, “Países da América Latina lideram produção de biodiesel,” [Online]. Available: <https://www.cpt.com.br/noticias/paises-da-america-latina-lideram-producao-de-biodiesel>. [Acedido em 2021 04 14].
- [70] T. d. C. Europeu, “Apoio da UE aos biocombustíveis sustentáveis nos transportes,” Portugal, 2023.
- [71] F. O. Brito, “Desenvolvimento de usina de produção de biodiesel a partir de óleo de fritura usando simuladores de processo: aspectos operacionais e ambientais,” Dissertação, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Ceará, Brasil, 2013.
- [72] I. Gosling, “Process Simulation and Modeling for Industrial Bioprocessing: Tools and Techniques,” *Industrial Bioprocessing*, vol. 1, nº 2, pp. 106-109, 2005.
- [73] Z. Hou and D. Zheng, “Solar utility and renewability evaluation for biodiesel production process,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 29, nº 14-15, pp. 3169-3174, 2009.
- [74] A. H. West, D. Posarac And N. Ellis, “Assessment of four biodiesel production processes using HYSYS,” *Bioresource technology*, vol. 99, nº 14, pp. 6587-6601, 2008.

- [75] ZERO – Associação Sistema Terrestre Sustentável, “Mais óleo de palma e colza nos depósitos dos carros do que nos nossos pratos,” 07 2020.
- [76] M. C. F. Almeida, “Otimização do processo de saponificação de óleo alimentar usado para preparação de detergente ecológicos,” 11 2020.
- [77] Cruz, Diogens & Silva, Camila & Menezes, Jeane & Magalhães, Adeildo & Faro, Fabricio, “Otimização do processo de produção de biodiesel e glicerol a partir do óleo de palma e soja por modelagem no software dwsim.,” *Brazilian Journal of Development*, nº 7, 2021.
- [78] F. M. Pereira, “Sustentabilidade e tecnologias ambientais,” em 2º *Seminário de Recursos Naturais*, Brasil.
- [79] F. R. d. Siqueira, “Modelagem termodinâmica do equilíbrio líquido-líquido de misturas ternárias biodiesel etílico + glicerol + etanol de diferentes fontes,” 2018.
- [80] Institute for Solar Research of the German Aerospace Center, *greenius The Green Energy System Analysis Tool*, Germany: DLR Institute of solar Research, 2019.
- [81] A. d. S. Perente, “Utilização de calor solar para processos industriais com temperaturas superiores a 150°C,” Junho 2019.
- [82] European Commission, “Dados meteorológicos do PVGIS,” [Online]. Available: https://www.pvsyst.com/help/meteo_source_pvgis.htm. [Acedido em 25 02 2024].
- [83] Greenius manual, DLR Solar Research, 2018.
- [84] Therminol VP-1 heat transfer fluid, *Ultra-high-temperature, vapor liquid phase fluid*, USA, 2019.
- [85] Padilha, Beatriz Ribeiro Petrucci; Junior, Luiz Moreira Coelho; Paraíba, Universidade Federal da, “Viabilidade econômica de substituição energética para aquecimento do óleo combustível em uma termelétrica do nordeste brasileiro.,” p. 4, 23 a 27 maio 2022.
- [86] CEA, “Key Performance Indicators to evaluate the integration of solar heating in industrial processes,” 2022.
- [87] Eurostat, “HICP-inflation rate,” 22 02 2024. [Online]. Available: <https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/tec00118/default/table?lang=en>. [Acedido em 07 03 2024].
- [88] República Portuguesa, “IVA da eletricidade e gás natural reduzido para 6% a partir de 1 de julho,” 13 05 2019. [Online]. Available: <https://www.portugal.gov.pt/pt/gc21/comunicacao/noticia?i=iva-da->

eletricidade-e-gas-natural-reduzido-para-6-a-partir-de-1-de-julho.
[Acedido em 13 01 2024].

- [89] EDP Comercial, “Tarifários,” Portugal, 2022.
- [90] Y. Louvet, S. Fischer, S. Furbo, F. Giovanetti, M. Köhl, F. Mauthner, D. Mugnier, D. Philippen e F. Veynand, “Guideline for levelized cost of heat calculations for solar thermal application,” 2019.
- [91] Aguiar, R & Colelho R., “Manual de Instalação e Utilização do software SolTerm,” em *Laboratório Nacional de Energia e Geologia*, Lisboa, IP, 2012.