



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS (CTG)
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

BRÁULIO BEZERRA BRANDÃO

**DIMENSIONAMENTO DE UM CONCENTRADOR SOLAR (CPC) PADRÃO PARA
INTEGRAÇÃO A UMA USINA DE PRODUÇÃO DE BIODIESEL**

Recife
2025

BRÁULIO BEZERRA BRANDÃO

**DIMENSIONAMENTO DE UM CONCENTRADOR SOLAR (CPC) PADRÃO PARA
INTEGRAÇÃO A UMA USINA DE PRODUÇÃO DE BIODIESEL**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica, Centro de Tecnologia e Geociêncas da Universidade Federal de Pernambuco, como parte dos requisitos parciais para obtenção do título de doutor em Engenharia Mecânica.

Orientador (a): Prof. Dr. JOSÉ CARLOS CHARAMBA DUTRA

Coorientador (a): Prof. Dr. JORGE RECARTE HENRIQUEZ GUERRERO

Recife

2025

.Catalogação de Publicação na Fonte. UFPE - Biblioteca Central

Brandão, Bráulio Bezerra.

Dimensionamento de um concentrador solar (CPC) padrão para integração a uma usina de produção de biodiesel / Bráulio Bezerra Brandão. - Recife, 2025.

146f.: il.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2025.

Orientação: Prof. Dr. José Carlos Charamba Dutra.

1. Concentrador parabólico composto; 2. Energia solar para calor de processo; 3. Biodiesel. I. Dutra, José Carlos Charamba. II. Título.

UFPE-Biblioteca Central

BRÁULIO BEZERRA BRANDÃO

DIMENSIONAMENTO DE UM CONCENTRADOR SOLAR (CPC) PADRÃO PARA INTEGRAÇÃO A UMA USINA DE PRODUÇÃO DE BIODIESEL

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica, Centro de Tecnologia e Geociência da Universidade Federal de Pernambuco, como parte dos requisitos parciais para obtenção do título de doutor em Engenharia Mecânica.

Aprovada em: 01/08/2025

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. José Carlos Charamba Dutra (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Marcus Costa de Araújo (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Álvaro Antônio Ochoa Villa (Examinador Interno)
Instituto Federal de Pernambuco

Prof. PhD. Pedro André Carvalho Rosas (Examinador Externo)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. José Claudino de Lira Júnior (Examinador Externo)
Universidade Federal de Pernambuco

DEDICATÓRIA

- Dedico a minha Formidável Família e aos Nobres Amigos!!!

AGRADECIMENTOS

Importante, mas muito difícil descrever todos os responsáveis pela elaboração deste trabalho, infelizmente, esquecerei de algumas pessoas.

Agradeço:

Ao Professor José Carlos Charamba Dutra (pela grande orientação)

Ao Professor Jorge Recarte Henriquez Guerrero (pelas ideais)

Aos membros da Banca Examinadora

A Jorge Oliveira, excelente pessoa e profissional.

A Yuri Fischer, Renato Wagner e James Melo grandes amigos e colaboradores.

Agradeço especialmente:

Minha Mãe: Heloisa, um exemplo de inspiração.

Minha Esposa Robertinha

Minhas Filhas Isadora e Lorena

Meus Irmãos e Irmã: Fabíola, Gláucio e Liélio

In memoriam:

Meu Grande Pai: Nivaldo, excelente pessoa que, infelizmente, partiu cedo!

A todos os familiares, João Bosco Bacana, amigos, colegas...MUITO OBRIGADO!!!!

“ Não existe justiça, onde os criminosos fazem as leis. ”

Bob Marley

RESUMO

A tese apresenta uma proposta de projeto de concentrador solar dimensionado para operar junto a uma planta de produção de biodiesel. O dispositivo escolhido é o Concentrador Parabólico Composto (CPC) com absorvedor em V invertido totalmente iluminado. O dimensionamento foi realizado considerando um levantamento prévio das demandas de energia de uma planta piloto de biodiesel operando em uma região com condições climáticas Nordeste do Brasil. A planta piloto está instalada na cidade de Caetés, Pernambuco, e produz biodiesel num processo em batelada, a partir de óleo de sementes de algodão, com potencial de 2500 litros de biodiesel/dia. O procedimento de dimensionamento do concentrador é mostrado no trabalho e as equações são resolvidas com o auxílio de um algoritmo de cálculo programado em MATLAB®. O dimensionamento foi realizado para duas condições climáticas, considerando os dados de irradiação das cidades de Caruaru-PE e Porto Alegre-RS, sendo analisadas 7 configurações de concentradores com distintos ângulos de aceitação (65° ; $56,40^\circ$; 50° ; $45,60^\circ$; $38,70^\circ$; $33,75^\circ$ e 30°). O CPC com ângulo de aceitação $56,40^\circ$ apresentou melhor desempenho térmico para ambas as regiões. Constatou-se que a variação de energia gerada entre regiões não é discrepante, permitindo o uso de um único CPC Padrão ($\theta_a = 56,40^\circ$, $\theta_t = 45,60^\circ$), o qual gerou 34.918,28 Wh/m² anuais e Razão Somatória Caruaru/Porto Alegre de 9,86. Integrado à Usina de Biodiesel de Garanhuns-PE, o sistema com 18 CPCs Padrão (3,80 m² cada) aqueceu 800 litros de fluido térmico para produção de 1000 litros de biodiesel, podendo suprir 165,28 kW em 21,47 horas, comprovando viabilidade técnica e eficiência como alternativa sustentável em pequenas usinas de biodiesel.

Palavras-chave: Concentrador Parabólico Composto; Energia Solar para Calor de Processo; Biodiesel.

ABSTRACT

This thesis presents a proposal for a solar concentrator designed to operate in conjunction with a biodiesel production plant. The chosen device is the Compound Parabolic Concentrator (CPC) with a fully illuminated inverted-V absorber. The sizing was performed based on a preliminary survey of the energy demands of a pilot biodiesel plant operating under the climatic conditions of Northeast Brazil. The pilot plant is located in the city of Caetés, Pernambuco, and produces biodiesel from cottonseed oil in a batch process, with a potential capacity of 2,500 liters/day (~660 US gallons/day). The concentrator sizing procedure is detailed in this work, with its governing equations solved using a calculation algorithm programmed in MATLAB®. The design was carried out for two distinct climatic conditions, considering irradiation data from the cities of Caruaru-PE and Porto Alegre-RS. Seven concentrator configurations with different acceptance angles (65°; 56.40°; 50°; 45.60°; 38.70°; 33.75° and 30°) were analyzed. The CPC with an acceptance angle of 56.40° demonstrated the best thermal performance for both regions. It was found that the variation in generated energy between the locations was not significant, allowing for the use of a single "Standard CPC" design ($\theta_a = 56.40^\circ$, $\theta_t = 45.60^\circ$). This standard unit generated 34,918.28 Wh/m² annually (~11,070 BTU/ft² annually) and yielded a Caruaru/Porto Alegre Summation Ratio of 9.86. When integrated with the Garanhuns-PE Biodiesel Plant, a system comprising 18 Standard CPCs (40.9 ft² each) heated 800 liters (~211 US gallons) of thermal fluid for the production of 1,000 liters (~264 US gallons) of biodiesel. The system was capable of supplying 165.28 kWh (~564,000 BTU) of thermal energy over 21.47 hours, proving its technical feasibility and efficiency as a sustainable alternative for small-scale biodiesel plants.

Keywords: Solar Process Heat, Compound Parabolic Concentrator (CPC), Biodiesel Production, System Sizing, MATLAB, Techno-economic Analysis.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Utilização da energia térmica solar no Brasil	17
Figura 2 - Utilização de utilização de coletores solares recentemente instalados	18
Figura 3 - Fluxograma integrado	23
Figura 4 - Curvas características da eficiência dos coletores-SRCC(2004)	25
Figura 5 - Princípio dos raios extremos	30
Figura 6 - Perfil do refletor do CPC mediante a aplicação do princípio dos raios extremos	31
Figura 7 - Elementos de uma parábola genérica	32
Figura 8 - Generalização do princípio para absorvedor não-plano	33
Figura 9 - Definição da construção da cavidade dos CPC	34
Figura 10 - Parâmetros da cavidade do CPC nas condições truncada (direita) e nominal (esquerda)	35
Figura 11 - Posicionamento espacial dos CPC	39
Figura 12 - Representação de um CPC de absorvedor V invertido	42
Figura 13 - Esquema térmico simplificado da produção de biodiesel	45
Figura 14 - Fluxograma resumido do processo da produção de Biodiesel	46
Figura 15 - CPC não Truncado	56
Figura 16 - Perfil do CPC após o truncamento	57
Figura 17 - Cavidade do CPC nas condições truncada (direita) e completa (esquerda)	57
Figura 18 - Representação do comprimento da superfície refletora	59
Figura 19 - Representação do balanço de energia em um CPC truncado	60
Figura 20 - Localização geográfica da cidade de Garanhuns	68
Figura 21 - Diagrama esquemático do processo para obtenção do óleo	69
Figura 22 - Trocador de calor com escoamento puramente contracorrente	78
Figura 23 - Circuito térmico associado a um trocador de calor	79
Figura 24 - Medidor de energia de fabricante Minipa, Modelo ET 5060C	82
Figura 25 - Alicate amperímetro usado no projeto	82
Figura 26 - Desenho esquemático de instalação do medidor de energia	82
Figura 27 - Potência ativa e reativa x tempo aferida pelo analisador de energia	83
Figura 28 - Comportamento da aplicação dos CPCs em ambas as cidades	87
Figura 29 - Gráfico da razão entre as energias geradas pelo CPC	90
Figura 30 - CPC Padrão com $\theta_a=56,40^\circ$ e $\theta_t=46,60^\circ$	90
Figura 31 - Representação do ângulo de aceitação θ_a e os de truncamento θ_t	91
Figura 32 - Dimensionamento (truncada) do CPC Padrão	91
Figura 33 - Distribuição mensal dos 12 meses do ano da energia gerada pelos CPCs	93

Figura 34 - Fluxograma do processo	102
Figura 35 - Diagrama detalhado depois e antes a integração dos coletores	115
Figura 36 - Etapa de armazenagem, transporte, peneiramento e quebra de grãos	137
Figura 37 - Fluxo da fase líquida entre o tanque pulmão e o degomador	138
Figura 38 - Tanque para o clareamento do óleo bruto	139
Figura 39 - Neutralização e processo de prensagem	139
Figura 40 - Saída do óleo vegetal	140
Figura 41 - Diagrama geral de reação da Usina Piloto	141
Figura 42 - Equipamentos utilizados na desumidificação do óleo neutralizado	142
Figura 43 - Tanque de preparo do catalisador	143
Figura 44 - Volume de controle para transesterificação	144
Figura 45 - Volume de controle no sistema de evaporação do álcool da fase pesada	145

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Elementos do processamento de óleo de algodão (NBR 5410 e NBR-5444)	44
Quadro 2 - Configurações analisadas de CPCs	88

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Distribuição da capacidade de processamento de óleo vegetal	20
Tabela 2 - Comparativo da quantidade de empresas e unidades industriais	20
Tabela 3 - Energia anual gerada e rendimentos do CPC em Wh/m ²	86
Tabela 4 - Razão anual de energia gerada pelo CPC nas duas cidades	89
Tabela 5 - Dados de truncamento do CPC padrão	93
Tabela 6 - Valores de energia média diária mensal gerada pelo CPC Padrão(Wh/m ²)	94
Tabela 7 - Tempo e energia consumida no processo de esmagamento	96
Tabela 8 - Balanço energético na produção de óleo de algodão (MJ.kg)	97
Tabela 9 - Energia consumida no processo de fabricação do biodiesel	98
Tabela 10 - Balanço na produção de 1000 litros biodiesel de algodão (MJ)	99
Tabela 11 - Balanço energético da produção de biodiesel de algodão em 3ha	100

LISTA DE ABRVIATURAS E SÍMBOLOS

ABREVIATURAS

ANP	Agência Nacional de Petróleo
B 100	Biodiesel puro (100%)
KOH	Hidróxido de potássio
MJ	Megajoules
NaOH	Hidróxido de sódio
ha	Hectare=>100.000m ²
NR	Norma regulamentadora
PER	Potência Excedente Registrada
PN	Potência nominal

SÍMBOLOS

A_a	Área do absorvedor
A_{Abs}	Absorvedor
A_c	Área de cobertura do coletor
A_r	Área da superfície refletora
C	Relação de concentração da cavidade
C_n	Concentração nominal
CPC	Concentrador Parabólico Composto
ds	Elemento de curva
e_1	Eixo de simetria da primeira parábola
e_2	Eixo de simetria da segunda parábola
e_3	Eixo de simetria da terceira parábola
E_d	Fração de energia emitida por uma superfície refletora ideal
f	Distância focal da parábola
F	Função aceitação angular do CPC
F_1	Foco da secção parabólica 1
F_2	Foco da secção parabólica 2
F_3	Foco da secção parabólica 3
F_R	Fator de remoção de calor
F_s	Função aceitação angular do CPC na região angular maior que θ_a
H	Altura da cavidade não truncada
H_t	Altura da cavidade truncada
I	Irradiação solar horária
I_b^n	Irradiação solar direta horária normal
I_b^c	Irradiação solar direta horária no plano do coletor
\hat{l}_c	Direção longitudinal do CPC
I_d^h	Irradiação solar horária difusa no plano horizontal
I_T	Irradiação solar total horária aceita pelo CPC
L	Comprimento da superfície refletora
L_t	Comprimento da superfície refletora truncada
L_i	Comprimento da superfície refletora da secção parabólica i
V	invertido com semiângulo de vértice igual a $\pi/2$
$\langle n \rangle$	Número médio de reflexões

\hat{n}_C	Direção normal à abertura do CPC
q_T	Energia térmica diária gerada
Q_T^a	Energia térmica anual gerada
Q_T^m	Energia térmica mensal gerada
r	Comprimento da base do absorvedor V invertido
\hat{s}_T	Direção transversal do CPC
t_i	Instante inicial (diário) de geração térmica pelo CPC
t_f	Instante final (diário) de geração térmica pelo CPC
T_{amb}	Temperatura ambiente
T_{max}	Temperatura ambiente máxima média
T_{med}	Temperatura ambiente média
T_{min}	Temperatura ambiente mínima média
T_e	Temperatura do fluido na entrada do coletor
U	Coeficiente de perdas térmicas do coletor CPC
V_1	Vértice da primeira parábola
V_2	Vértice da segunda parábola
V_3	Vértice da terceira parábola
X	Semi-abertura da cavidade concentradora
X_t	Semi-abertura da cavidade concentradora truncada
x	Coordenada cartesiana
y	Coordenada cartesiana
α	Absortância do absorvedor
β	Ângulo de inclinação do coletor em relação a horizontal local
γ	Semi-ângulo de vértice do absorvedor V invertido
δ	Declinação solar
η	Eficiência ótica
λ	Latitude
θ_a	Ângulo de aceitação do concentrador CPC
θ_i	Ângulo de incidência do raio do sol
θ_t	Ângulo de truncamento do CPC
ρ	Coeficiente de refletividade da superfície refletora
τ	Transmitância do vidro
ϕ	Ângulo polar
Δs	Diferença de comprimento
ΔT	Diferença de temperatura

Sumário

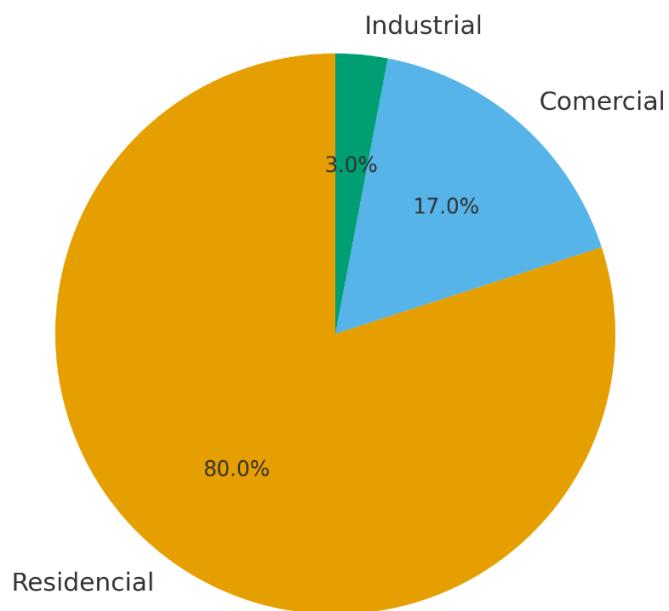
1	INTRODUÇÃO	17
1.1	OBJETIVOS DO TRABALHO	21
1.1.1	Objetivos Geral	21
1.1.2	Objetivos Específicos	21
1.1.3	Estrutura do trabalho	22
1.2	FLUXOGRAMA DA PESQUISA	23
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	24
2.1	FUNDAMENTOS E EVOLUÇÃO DOS COLETORES SOLARES CONCENTRADORES E CPCs	24
2.2	PANORAMA DO BIODIESEL E UTILIZAÇÃO DA ENERGIA SOLAR PARA CALOR DE PROCESSO	27
2.3	INTEGRAÇÃO DE ENERGIA SOLAR EM PROCESSOS DE PRODUÇÃO DE BIODIESEL: O ESTADO DA ARTE E AS LACUNAS	28
3	CONCEITOS FUNDAMENTAIS	30
3.1	FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE UM CPC	30
3.1.1	Equação da parábola na forma polar	31
3.1.2	Involuta - Generalização do princípio dos raios extremos para absorvedor não plano	32
3.1.3	Princípio de construção da cavidade refletora	33
3.1.4	Direção dos concentradores solares	38
3.1.5	Fundamentos da energia aceita pelo CPC	40
3.2	PROCESSOS E OPERAÇÃO DE UMA USINA DE BIODIESEL	43
3.3	PRODUÇÃO DE BIODIESEL TRANSESTERIFICADO PARA ESTIMATIVA DE BALANÇO ENERGÉTICO E TROCADOR DE CALOR	45
3.3.1	Processo para transesterificação de biodiesel	46
3.3.2	Conceito e fundamentação Matemática de Trocadores de Calor de Casco e Tubos	47
4	METODOLOGIA UTILIZADA	55
4.1	INTRODUÇÃO AOS MÉTODOS	55
4.1.1	Superfície refletora do CPC	56
4.1.2	Método para cálculo da energia gerada pelo CPC	60
4.1.3	Método proposto de obtenção do CPC Padrão	61
4.1.4	Análise do coletor e filtragem nos dados das plataformas	62
4.1.5	Detalhamento do Modelo Numérico e Premissas de Cálculo	63
4.2	DESCRÍÇÃO DA USINA DE BIODIESEL EM CAETÉS (PERNAMBUCO)	67
4.2.1	Utilização da energia heliotérmica e análise energética	68
4.2.2	Estimativa da energia consumida no esmagamento	69
4.3	PROCESSO DE PRODUÇÃO DE BIODIESEL	70
4.4	MEMÓRIA DE CÁLCULO DO TROCADOR DE CALOR E EQUIPAMENTOS AUXILIARES	71
4.4.1	Dimensionamento do trocador de calor de casco e tubo	72
4.4.2	Bombeamento do fluido térmico	79
4.4.3	Cálculos para capacidade do reservatório térmico	80
4.5	MATERIAIS E MÉTODOS DE AFERIÇÃO DA ENERGIA ELÉTRICA	81
4.5.1	Medição da energia elétrica na produção de biodiesel	81
4.5.2	Confiabilidade e incerteza das medições	84

5	DIMENSIONAMENTO E PROJETO DO SISTEMA SOLAR-BIODIESEL	86
5.1	Determinação do coletor CPC padrão	86
5.1.2	Análise comparativa entre Caruaru e Porto Alegre	87
5.1.3	Análise dos truncamentos para melhor desempenho térmico dos CPCs	88
5.2	BALANÇO ENERGÉTICO DA PLANTA DE BIODIESEL	94
5.2.1	Esmagamento de grãos: Tempo e energia consumida	95
5.2.2	Balanço energético para produção de óleo bruto de algodão	97
5.2.3	Correlação entre tempo e energia da produção	98
5.2.4	Rendimento bruto da produção de biodiesel	100
5.3	PROJETO DO SISTEMA DE INTEGRAÇÃO TÉRMICA	101
5.3.1	Procedimento geral de dimensionamento	102
5.3.2	Demanda térmica do trocador de calor	104
5.3.3	Dimensionamento do sistema de bombeamento	111
5.3.4	Dimensionamento do reservatório	112
5.4	RESUMO DO SISTEMA PROJETADO	113
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO	114
6.1	ANÁLISE DE DESEMPENHO DO SISTEMA INTEGRADO	114
6.2	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	117
6.2.1	Viabilidade Técnica da Integração	118
6.2.2	Implicações da substituição energética e sustentabilidade	119
6.3	CONTRIBUIÇÃO E LIMITAÇÕES	119
6.3.1	Limitações do Trabalho	122
6.3.2	Limitações da Análise Econômica	123
6.4	TRABALHOS FUTUROS	124
6.4.1	Validação experimental e expansão do modelo	124
7	CONCLUSÃO	126
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	127
	APÊNDICES	136
	Detalhamento do processo de produção na usina de biodiesel	136

1 INTRODUÇÃO

De acordo com o Balanço Energético Nacional de 2024 a energia solar térmica total no Brasil gerou aproximadamente 6,5 TWh (terawatts-hora) a partir de coletores solares. Este número inclui todos os setores (residencial cerca de 80%, comercial e serviços foi aproximadamente 17,3). A fatia do setor industrial, desse mercado de aquecimento solar, (que inclui calor de processo) representa aproximadamente 3%. A energia para calor de processo industrial \approx 3% de 6,5 TWh ou 0,195 TWh (Figura 1).

Figura 1- Utilização da energia térmica solar no Brasil

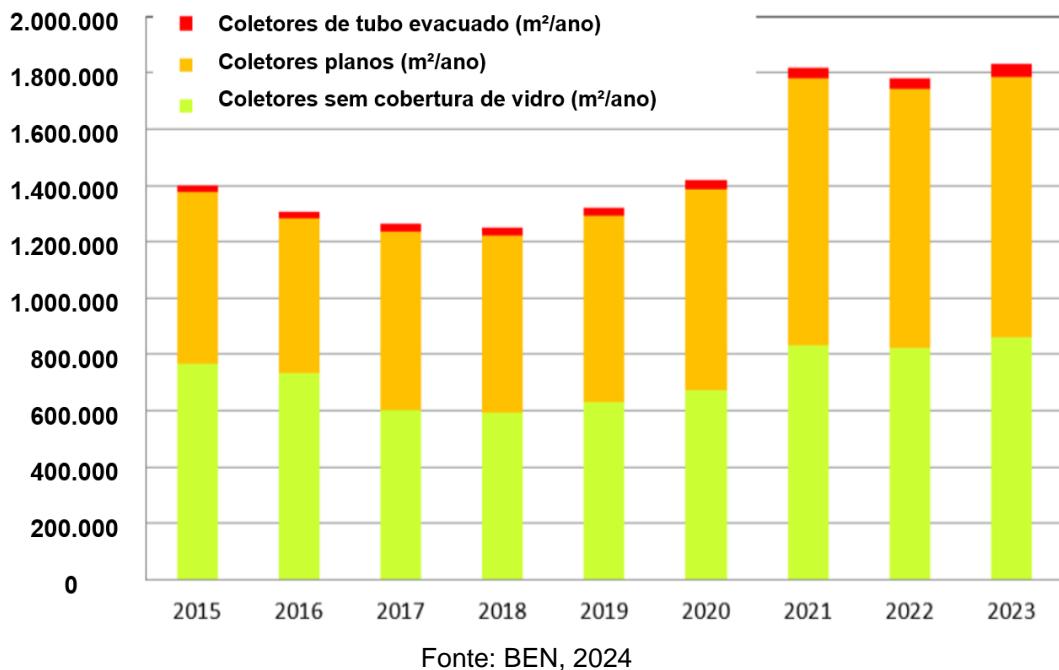


Fonte: BEN 2024

A Matriz Energética total do Brasil (oferta interna de energia) foi de aproximadamente 305 milhões de Toneladas Equivalentes de Petróleo (TEP), o que equivale a cerca de 3.547 TWh. Assim, a porcentagem para calor de processo é de aproximadamente 0,0055%. Concluindo que a participação da energia solar gerada especificamente para calor de processo, utilizando concentradores solares, na matriz energética brasileira ainda é muito incipiente (Figura 2). Este dado reforça imensamente a importância de trabalhos de pesquisas heliotérmica. Provando que, apesar do imenso potencial, esta é uma

área ainda largamente inexplorada buscando aplicações para tentar mudar este cenário.

Figura 2 - Utilização de utilização de coletores solares recentemente instalados



A busca por uma matriz energética mais sustentável e resiliente é um imperativo global, impulsionado pelas mudanças climáticas e pela volatilidade dos mercados de combustíveis fósseis. Nesse cenário, o Brasil, detentor de um dos maiores potenciais de irradiação solar do mundo, destaca-se como um palco privilegiado para o desenvolvimento e a implementação de tecnologias solares. Embora a energia fotovoltaica tenha experimentado um crescimento exponencial, a energia heliotérmica, ou Concentrated Solar Power - CSP, que converte a luz solar em calor concentrado para diversas aplicações, ainda apresenta um vasto e, em grande parte, inexplorado potencial, especialmente para o suprimento de calor de processo industrial. Existe, portanto, uma lacuna significativa na literatura e nas aplicações práticas que abordem a integração eficiente de sistemas heliotérmicos para atender às demandas térmicas de processos industriais, um desafio que este trabalho se propõe a enfrentar.

A relevância deste estudo é acentuada no contexto da produção de biocombustíveis, como o biodiesel, cujo montante produzido no Brasil atingiu 601,4 mil m³ em janeiro de 2024. A fabricação de biodiesel é um processo termicamente intensivo, exigindo calor de processo em várias de suas etapas. A integração com

fontes de energia renováveis, como a solar heliotérmica, surge como uma estratégia promissora para não apenas reduzir custos operacionais e a pegada de carbono, mas também para aumentar a eficiência energética e a sustentabilidade geral do processo (Mehrpooya et al., 2020; Jesus et al., 2018). Contudo, a escolha e o dimensionamento do concentrador solar adequado para essa integração ainda representam desafios, principalmente devido à intermitência da fonte e à necessidade de gerenciamento térmico eficiente.

No cenário global, a energia heliotérmica, embora menos difundida que a fotovoltaica (com apenas 6,4 GW de CSP contra 707,5 GW de FV em 2020, segundo a IRENA), demonstra sua capacidade em projetos de grande escala, como a usina de Ivanpah (392 MW nos EUA) e o complexo de Khavda (Índia). Essas instalações destacam a maturidade tecnológica e o potencial para geração de energia. Uma vantagem distintiva da heliotérmica é sua capacidade de integrar sistemas de armazenamento térmico, que permitem estocar o calor excedente para uso noturno ou em dias nublados, conferindo flexibilidade e confiabilidade operacional que superam a intermitência da geração solar fotovoltaica. Este aspecto é fundamental para aplicações industriais que exigem fornecimento contínuo de calor (Kurhe et al., 2020). Apesar dos desafios como os custos iniciais e a manutenção, as vantagens da redução de custos operacionais a longo prazo, sustentabilidade e a possibilidade de integração com outras fontes energéticas, reforçam o seu papel estratégico.

Diante da necessidade de diminuir a dependência de combustíveis fósseis e da crescente demanda por soluções energéticas mais sustentáveis, o biodiesel se consolidou na matriz energética brasileira, regido pela Lei 11.097/2005. Sua produção, a partir de óleos vegetais e gorduras animais por transesterificação, apresenta características que se alinham perfeitamente à proposta de integração com energia solar térmica. O setor, evidenciado pela capacidade de processamento de 219.067 toneladas/dia de óleo vegetal no Brasil em 2024 (Associação Brasileira das Indústria de Óleos Vegetais - ABIOVE, 2024), busca continuamente por inovações que otimizem seus processos, como o pré-aquecimento de reagentes que já demonstrou reduzir o consumo de energia convencional (Hamed et al., 2023). O levantamento anual realizado pela ABIOVE, considerando 330 dias trabalhados, tem-se a capacidade anual de cerca de 72,3 milhões de toneladas (Tabela 1).

Tabela 1 - Distribuição da capacidade de processamento de óleo vegetal.

FAIXAS DE CAPACIDADE (TONELADAS POR DIA)	2023			2024			Var. Inter anual
	Toneladas por dia	Toneladas por ano*	Variação	Toneladas por dia	Toneladas por ano**	Variação	
Até 600	11.880	3.920.400	5,70%	12.430	4.101.900	5,70%	4,60%
601 a 1.500	42.624	14.065.920	20,30%	40.024	13.207.920	18,30%	-6,10%
1.501 a 3.000	99.136	32.714.880	47,30%	100.115	33.037.950	45,70%	1,00%
3.001 a 4.000	29.292	9.666.360	14,00%	35.718	11.786.940	16,30%	21,90%
4.001 a 6.000	20.000	6.600.000	9,50%	24.080	7.946.400	11,00%	20,40%
Acima de 6.000	6.700	2.211.000	3,20%	6.700	2.211.000	3,10%	0,00%
TOTAL*	209.632	69.178.560	100%	219.067	72.292.110	100%	4,50%

*Os valores apresentados contemplam unidades ativas e paradas.

**São considerados 330 dias para o cálculo da capacidade anual.

Fonte: BEN (2024).

A ABOVE realizou, em 2023, uma pesquisa com 67 empresas produtoras de óleo vegetal, as quais 34,3% também possuem usinas de biodiesel anexas e 8 possuem refinarias para a produção de alimentos. Essa integração diversifica a oferta de produtos e atende a demanda por fontes de energia renováveis e sustentáveis, além de garantir a qualidade dos óleos refinados para alimentação. Assim, contribui de forma significativa para a matriz energética e a segurança alimentar nacional. O esmagamento é complementado por unidades que agregam valor ao óleo vegetal, refletindo uma dinâmica em transformação no setor. A Tabela 2 mostra o comparativo da quantidade de empresas e unidades industriais entre 2023 e 2024.

Tabela 2 – Comparativo da quantidade de empresas e unidades industriais

SITUAÇÃO	2023	2024	Variação
Ativa	19.822	20.912	5,50%
Parada	2.550	2.431	-4,70%
TOTAL	22.372	23.343	4,30%

Fonte: ABIOVE -2024

Diante da crescente demanda e necessidade de estudos e desenvolvimento de sistemas energeticamente eficientes e de alto desempenho térmico, neste trabalho será analisada a integração de um sistema térmico solar formado por coletores parabólicos compostos (CPC) com absorvedor V invertido Completamente Iluminado - o absorvedor V receberá radiação diretamente na parte superior e na inferior pelas reflexões da cavidade - à uma usina de produção de biodiesel para atendimento da

sua carga de demanda de energia térmica. A pesquisa aborda, de forma sistemática, a otimização geométrica do CPC, a realização de um balanço energético detalhado para as demandas térmicas da usina e o dimensionamento dos componentes de integração. O estudo compara o desempenho do sistema em diferentes condições climáticas (Caruaru-PE e Porto Alegre - RS) e, por meio de uma análise rigorosa, demonstra a viabilidade técnica da proposta de utilizar a energia solar heliotérmica como fonte primária para o calor de processo na fabricação de biodiesel.

1.1 OBJETIVOS DO TRABALHO

1.1.1 Objetivo Geral

Propor o uso de um sistema de geração de calor, formado por Concentradores Parabólicos Compostos (CPC - Padrão) com Absorvedor V Invertido Totalmente Iluminado, para suprimento de energia térmica à uma usina piloto na produção de biodiesel.

1.1.2 Objetivos Específicos:

- Desenvolver um método para encontrar um CPC Padrão, por meio de cálculo da energia térmica gerada deste equipamento nos municípios brasileiros de Caruaru-PE e Porto Alegre-RS, escolhidos pelas suas características climáticas e *solarimétricas* distintas;
- Levantar as demandas de energia térmica de uma planta piloto de biodiesel;
- Dimensionar o sistema formado por coletores CPC Padrão do modelo encontrado e equipamentos auxiliares, para atender a demanda de energia térmica da Usina Piloto de Produção de Biodiesel localizada na cidade de Caetés-PE.

1.1.3 Estrutura do trabalho

O trabalho se estrutura da seguinte forma:

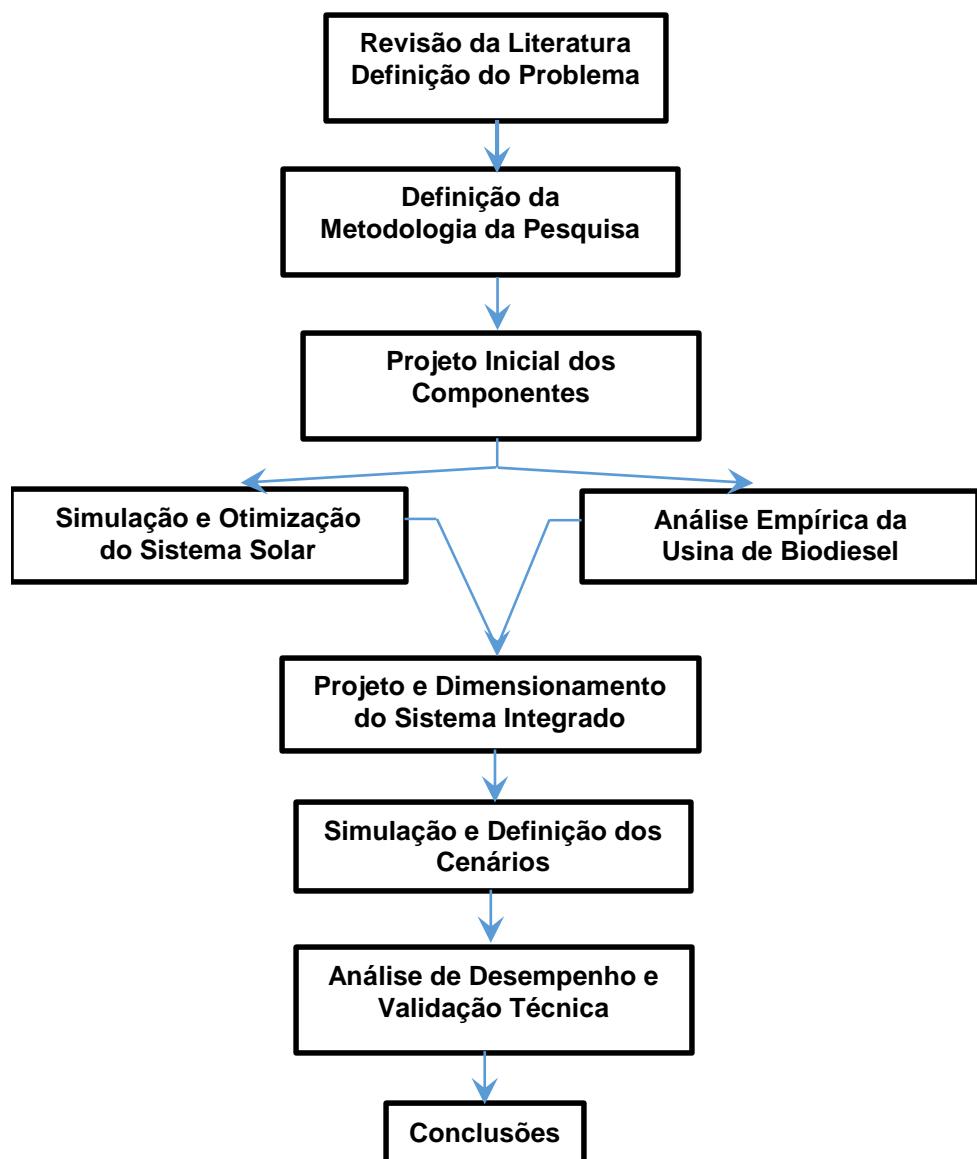
O **Capítulo 1** introduz o tema, contextualiza o problema da demanda energética na agroindústria de biodiesel e apresenta a justificativa, os objetivos e o roteiro da pesquisa. O **Capítulo 2** apresenta uma detalhada revisão de literatura, abordando os fundamentos dos Concentradores Parabólicos Compostos (CPCs), os avanços na sua otimização e as aplicações de energia solar para calor de processo, convergindo para a lacuna de pesquisa que este trabalho se propõe a preencher. O **Capítulo 3** detalha os conceitos fundamentais da teoria de concentradores solares e do processo de produção de biodiesel, estabelecendo a base teórica necessária para o desenvolvimento do estudo. O **Capítulo 4** descreve a metodologia utilizada, incluindo o método de simulação para o CPC, o protocolo de medição para o balanço energético da usina e a abordagem analítica para o dimensionamento do sistema de integração. O **Capítulo 5**, dedicado ao dimensionamento e projeto do sistema, aplica a metodologia para determinar o "CPC Padrão", realizar o balanço energético da planta e dimensionar todos os componentes da integração, como o trocador de calor, a bomba e o reservatório. O **Capítulo 6** apresenta os resultados e a discussão. São expostos os dados de desempenho do sistema projetado, os resultados do balanço energético e a análise comparativa com a literatura, culminando na comprovação da viabilidade técnica da proposta e na discussão das implicações do estudo. O **Capítulo 7** consolida as conclusões finais do trabalho, sintetizando as principais contribuições e respondendo aos objetivos propostos, além de sugerir trabalhos futuros. Finalmente, o **Capítulo 8** lista as referências bibliográficas utilizadas.

Ressaltando que o escopo do trabalho sempre foca em estabelecer a viabilidade técnica da proposta através do dimensionamento e otimização do sistema de geração solar, da quantificação da demanda energética da usina com base em medições de campo e do dimensionamento da interface de integração. A análise de desempenho do sistema integrado operando de forma dinâmica, ao longo do tempo, bem como a análise de viabilidade financeira desse projeto são propostas como uma continuação natural desta pesquisa, na Seção de Trabalhos Futuros.

1.2 FLUXOGRAMA DA PESQUISA.

Para proporcionar uma visão clara e integrada da estrutura e da sequência lógica adotada no trabalho, a Figura 2.1 a seguir apresenta o fluxograma completo da pesquisa. O diagrama ilustra as principais fases do trabalho, desde a fundamentação teórica e metodológica, passando pela análise e dimensionamento dos sistemas, até a obtenção e discussão dos resultados finais, que culminam na comprovação da viabilidade da proposta.

Figura 3 - Fluxograma integrado



Fonte: O Autor (2025)

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo estabelece o embasamento teórico deste trabalho, apresentando uma análise crítica da literatura sobre concentradores parabólicos compostos (CPC), sistemas heliotérmico e sua integração em processos industriais, com foco particular na produção de biodiesel. O objetivo central é contextualizar o estado da arte das tecnologias solares térmicas, identificar as lacunas de pesquisa existentes e, a partir delas, justificar e fundamentar os parâmetros e a metodologia empregados no desenvolvimento da tese, que visa o dimensionamento e a otimização de um sistema solar heliotérmico para suprimento de calor de processo em uma usina de biodiesel.

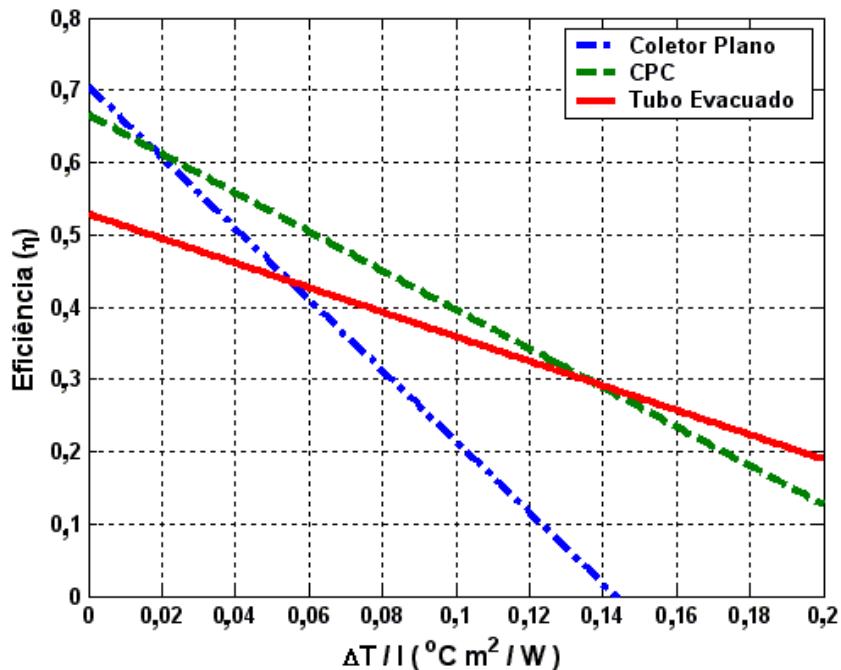
2.1 FUNDAMENTOS E EVOLUÇÃO DOS COLETORES SOLARES CONCENTRADORES E CPCs

A crescente demanda por fontes de energia sustentáveis tem impulsionado a busca por alternativas aos combustíveis fósseis, com destaque para a energia solar em diversas aplicações. No contexto da geração de calor de processo em temperaturas intermediárias (entre 80°C e 250°C), os Coletores Solares Concentradores - CSC emergem como uma solução de alta performance e sustentabilidade. Entre as diversas tipologias de CSC, os Concentradores Parabólicos Compostos - CPCs são particularmente promissores devido à sua capacidade de concentração da radiação solar sem a necessidade de sistemas de rastreamento complexos, ou com rastreamento simplificado/sazonal (Francesconi et al., 2018; Collares-Pereira et al., 2019).

O pioneirismo nos estudos sobre as propriedades geométricas, óticas e térmicas dos CPCs para absorvedores planos foi estabelecido por Rabl (1976, 1979, 1980), cujos trabalhos seminais pavimentaram o caminho para inúmeras pesquisas subsequentes. A Figura 4 ilustra a competitividade dos CPCs de baixa relação de concentração, que demonstram eficiência superior a coletores planos a partir de um parâmetro certo parâmetro ($\Delta T / I$) e são comparáveis a coletores de tubo evacuado em certas faixas de operação, oferecendo uma tecnologia construtiva intermediária, são estes os coletores mais utilizados no campo heliotérmico. A variação da eficiência dos coletores, η é mostrada na ordenada e na abscissa o parâmetro $\Delta T / I$; o ΔT indica

a diferença entre a temperatura do fluido na entrada do coletor (T_e) e a temperatura ambiente (T_{amb}) e (I) a irradiação solar incidente no plano do coletor. Pode-se observar que a partir de $\Delta T / I = 0,02$, o coletor CPC apresenta uma eficiência superior aos coletores de placas planas. Entretanto, o coletor de tubo evacuado apresenta desempenho térmico superior ao CPC a partir de $\Delta T / I = 0,14$.

Figura 4 - Curvas características da eficiência dos coletores - SRCC (2004).



Fonte: Solar Rating and Certification Corporation/FSEC (2004)

Os coletores concentradores do tipo CPC de baixa relação de concentração apresentam alternativas viáveis para as circunstâncias mencionadas anteriormente pelas seguintes razões:

- São estacionários, tais como os coletores planos;
- Apresentam tecnologia construtiva intermediária entre o coletor plano e o de tubo evacuado;
- Mostram competitividade em relação aos coletores planos nas regiões de maiores temperaturas operacionais.

Particularmente relevante para este estudo é o CPC com absorvedor V invertido completamente iluminado, desenvolvido por Collares-Pereira e comercializado por AO SOL (2003). Contudo, observa-se uma escassez de publicações detalhadas sobre suas propriedades geométricas, óticas, térmicas e energéticas por seus autores, o que justifica aprofundamento. Brandão et al. (2004) contribuíram significativamente ao revelar as equações de construção e propriedades óticas deste tipo de CPC, posteriormente complementado por Brandão et al. (2008) com um estudo sobre a otimização geométrica via truncamento da cavidade refletora.

A pesquisa no campo dos CPCs tem evoluído, abordando a otimização de seu desempenho através de diversas abordagens:

Otimização Geométrica e Ótica: Estudos como os de Ustaoglu et al. (2016) demonstram melhorias na uniformidade do absorvedor via truncamento do refletor sem perdas substanciais de desempenho. Fraidenraich et al. (2017) propuseram uma abordagem para calcular a função de aceitação angular, fundamental para o projeto e testes de qualidade. Pesquisas recentes de Xu et al. (2021) buscam resolver a não uniformidade de energia e o custo de fabricação através de otimização multiobjetivo em CPCs multissecionais;

Configurações e Materiais: Gata-Amaral et al. (2006) exploraram designs complexos com múltiplos tubos. Collares-Pereira et al. (2019) desenvolveram métodos para projeto customizado de CPCs quase estacionários visando a minimização do Custo Nivelado do Calor Entregue. O desenvolvimento de materiais mais eficientes e duráveis, especialmente para resistência a altas temperaturas em materiais isolantes, é uma área de grande interesse (Ingenhoven et al. 2023);

Desempenho Térmico: Lara et al. (2021) realizaram estudos comparativos da radiação coletada em CPCs com e sem rastreamento, mostrando o potencial de designs V-invertido estacionários. Moreno et al. (2022) e Gu et al. (2014) analisaram a disposição do absorvedor e a distribuição de fluxo solar, respectivamente, para melhorias na eficiência térmica de CPCs sem rastreamento. Xu et al. (2022) simularam o desempenho de CPCs com absorvedor plano e microcanal, atingindo fluxos de calor de até 7,61 kW/m² sob certas condições.

Esses estudos consolidam o entendimento sobre as capacidades e os desafios dos CPCs, estabelecendo a base para este trabalho, que se aprofundará no dimensionamento térmico e na integração de um CPC com absorvedor V-invertido para uma aplicação industrial específica.

2.2 PANORAMA DA PRODUÇÃO DE BIODIESEL E A DEMANDA POR ENERGIA TÉRMICA

O biodiesel, historicamente reconhecido desde a invenção do motor diesel por Rudolf Diesel em 1895, que utilizava óleo de amendoim como combustível, ressurge como uma alternativa energética estratégica em momentos de crise e busca por sustentabilidade. Após um período de descontinuidade de pesquisas devido à baixa competitividade econômica na década de 1980 (Knothe et al., 2006), o interesse na transesterificação de óleos vegetais em ésteres metílicos foi revitalizado por políticas de incentivo e regulamentações, como o Renewable Fuel Standard - RFS nos EUA, que impulsionou um crescimento de 38,3% na produção de biocombustíveis em 2024 (Biodieselbr, 2024).

No Brasil, o biodiesel foi formalmente inserido na matriz energética com a Lei 11.097/2005, que estabeleceu um marco regulatório e metas crescentes de mistura obrigatória ao diesel fóssil. Este programa resultou em uma produção acumulada de 77 bilhões de litros em 20 anos, atingindo 601,4 mil m³ em janeiro de 2024, evidenciando o papel crucial do país no cenário global, embora com desafios recentes em comparação com o crescimento da Indonésia, líder mundial desde 2019 (Biodieselbr, 2024). A matéria-prima predominante é a soja, complementada por óleos de fritura usados, e o processo de transesterificação é fundamental para reduzir a densidade e viscosidade do óleo vegetal, removendo a glicerina.

A indústria de processamento de óleos vegetais no Brasil apresenta uma robusta capacidade. Este cenário demonstra um setor dinâmico e estratégico para a matriz energética e segurança alimentar nacional, com descrito no Capítulo 1. Crucialmente, a produção de biodiesel é um processo termicamente intensivo, exigindo calor em diversas etapas para aquecimento de reagentes e separação de produtos. Esta demanda energética apresenta um desafio operacional e ambiental, mas, ao mesmo tempo, uma oportunidade ímpar para a integração de fontes de energia renováveis. Estudos como os de Milazzo et al. (2013) e Chechetto et al. (2010) quantificam a energia consumida na produção de biodiesel de soja e mamona, respectivamente, reforçando a necessidade de otimização energética do processo.

2.3 INTEGRAÇÃO DE ENERGIA SOLAR EM PROCESSOS DE PRODUÇÃO DE BIODIESEL: O ESTADO DA ARTE E AS LACUNAS

A utilização de sistemas solares térmicos para suprir calor em processos industriais tem ganhado crescente interesse, representando uma iniciativa vital para a *descarbonização* da indústria (Gil et al., 2023). No setor de biodiesel, a sinergia entre a produção e a energia solar é particularmente promissora. Diversos estudos demonstram a viabilidade e os benefícios dessa integração:

Pré-aquecimento de Reagentes: Hamed et al. (2023) mostraram que a aplicação de concentradores solares para pré-aquecimento de reagentes na transesterificação resultou em significativa redução do consumo de energia convencional;

Sistemas Híbridos e Cogeração: Mehrpooya et al. (2019) simularam a integração de campos solares com sistemas de cogeração, indicando aumento de eficiência térmica e economia de combustível, com um período de retorno de seis anos. Em outro trabalho, Mehrpooya et al. (2020) projetaram uma planta de cogeração com ciclo orgânico Rankine, combinada com um sistema de *Coletor de Calha Parabólica*, para produção simultânea de biodiesel e energia;

Aquecimento de Água e Desempenho: Kurhe et al. (2020) realizaram um estudo comparativo do desempenho de 200 CPCs de tubo evacuado para aquecimento de água de alimentação de caldeira, mostrando sua eficácia na economia de combustível fóssil. Kailash e Murali (2024) desenvolveram um sistema de transesterificação totalmente solar, alcançando altas taxas de conversão;

Novas Configurações e Otimização: Roshdan et al. (2024) desenvolveram e avaliaram um Concentrador Parabólico Composto Assimétrico – CPCA, PV/T para fachadas de edifícios, superando os CPCs simétricos convencionais em desempenho.

Maity et al. (2024) ressaltam a importância do desenvolvimento de modelos e ferramentas de simulação para otimizar o desempenho de sistemas de concentração solar. Zhang et al. (2024) desenvolveram sistemas acoplados de bomba de calor de fonte de ar-solar para aquecimento em regiões frias, demonstrando o potencial de otimização de sistemas complexos para reduzir o consumo energético. Wang et al. (2024) propuseram uma metodologia de design para ciclos Rankine com base na correspondência de calor, otimizando o desempenho entre fontes e fluidos de trabalho sem predefinições. Ingenhoven et al. (2023) exploraram análises técnico-econômicas de usinas solares térmicas concentradas em alta temperatura para calor de processo.

1. Lacunas da Literatura e Contribuição deste Trabalho:

Apesar do crescente corpo de literatura que valida a viabilidade técnica e sustentável da integração de energia solar para calor de processo e especificamente na produção de biodiesel, observa-se que a maior parte dos estudos analisaram o comportamento ótico e geométrico dos coletores solares concentradores, ou abordaram estudos de caso com análises de viabilidade que carecem de um enfoque mais aprofundado na parte térmica do calor gerado de forma integrada a um processo real.

As pesquisas sobre CPCs frequentemente se concentram em um tipo específico para uma determinada localidade, sem explorar a fundo o dimensionamento para uma carga térmica consolidada e multifásica como a de uma usina de biodiesel. A literatura apresenta uma lacuna no que diz respeito ao dimensionamento otimizado de um CPC específico (com absorvedor V invertido) para atender ao balanço energético completo (as quatro etapas) de um processo de produção de biodiesel, considerando as condições climáticas e solarimétricas brasileiras e a análise de métricas operacionais como a *Potência Excedente Registrada - PER*.

Neste cenário, a contribuição original desse trabalho reside em estabelecer a viabilidade técnica e energética da integração de um sistema heliotérmico com CPC de absorvedor V invertido para uma usina piloto de produção de biodiesel. A maioria das bibliografias analisaram o comportamento ótico e geométrica dos coletores CPCs, concentradores de tubo evacuados ou abordaram estudos de casos com análises de viabilidade técnica e econômica destes equipamentos, todavia sem maior enfoque na parte térmica de calor gerado. De uma maneira geral, as pesquisas sobre CPCs, observadas na literatura, apresentaram estudos com um determinado tipo de CPC para apenas uma determinada localidade.

Utilizar fontes renováveis nas indústrias de produção de biodiesel contribuem, de forma relevante, para a sustentabilidade, visto que este combustível está presente em diferentes aplicações que promovem o desenvolvimento socioeconômico e ambiental. A utilização de CPCs, neste tipo de indústria, proporcionaria maior independência energética das concessionárias e melhor eficiência na cadeia de produção.

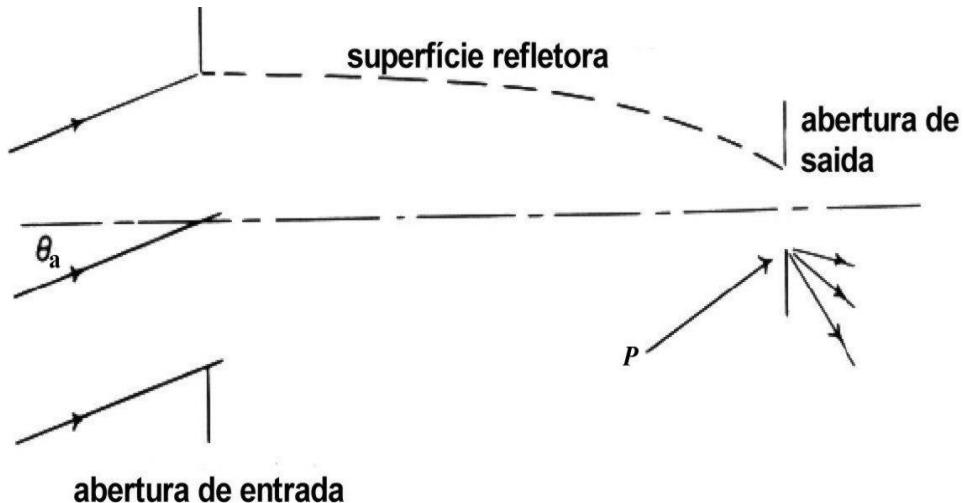
3 CONCEITOS FUNDAMENTAIS

Esse Capítulo tem por função mostrar os princípios básicos, fundamentação teórica, abordando os conceitos de Concentrador Parabólico Composto CPC e com absorvedor V invertido totalmente iluminado. Bem como princípios fundamentais do funcionamento de uma usina para produzir biodiesel, pelo processo de transesterificação, desde o esmagamento da oleaginosa até a produção do combustível.

3.1 FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE UM CPC

A Figura 5 mostra a visão em corte de um concentrador genérico bidimensional, onde θ_a é o ângulo extremo de penetração do raio do sol no concentrador, o qual entra no concentrador.

Figura 5 – Princípio dos raios extremos

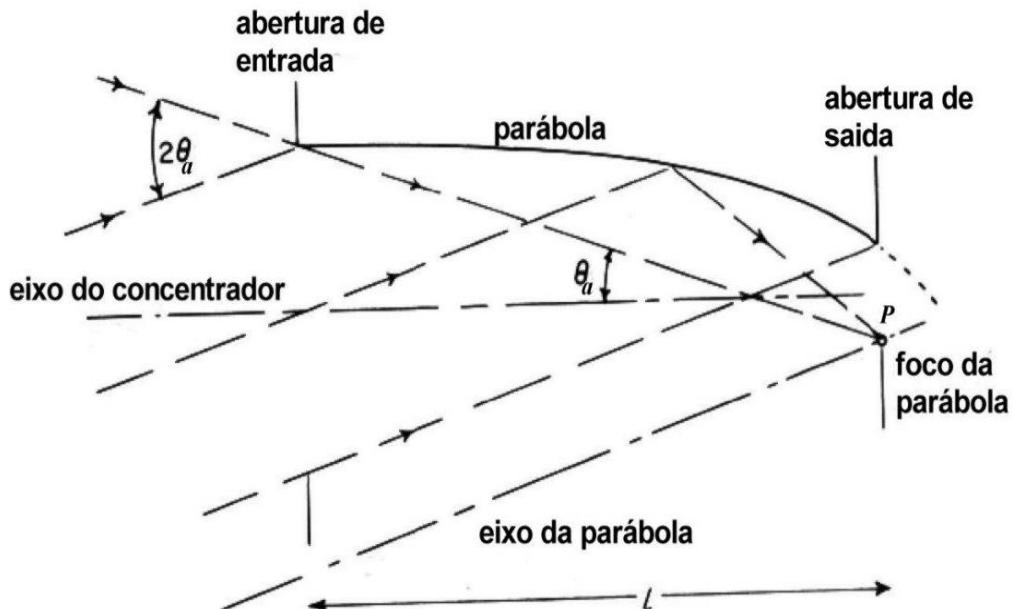


Fonte: Welford; Winston (1978)

O princípio dos raios extremos (Welford; Winston, 1978) estabelece que todos os raios que penetram no concentrador, dentro de um ângulo extremo θ_a , deverão emergir através do ponto extremo P da saída do concentrador.

A solução para a superfície que respeita este princípio é bastante trivial à medida que é bem conhecido que uma parábola, com seu eixo paralelo à direção θ_a e com foco em P , satisfaz essa condição conforme pode ser visto na Figura 6.

Figura 6 – Perfil do refletor do CPC mediante a aplicação do princípio dos raios extremos



Fonte: Welford; Winston (1978)

Este coletor concentra a radiação solar de uma forma ideal máxima (θ_a é o ângulo de aceitação da radiação pelo CPC) de acordo com os limites permitidos pela termodinâmica (Welford; Winston, 1978; Rabl, 1976). Para um concentrador bidimensional, a concentração nominal é expressa por:

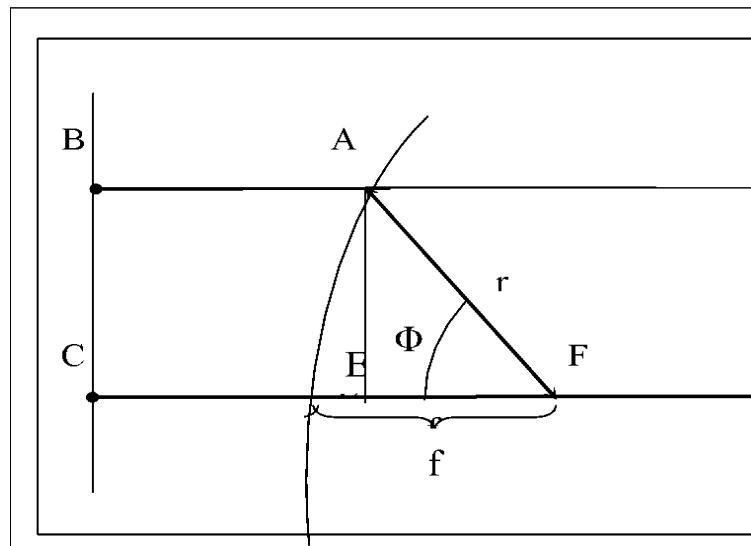
$$C_n = \frac{1}{\sin(\theta_a)} \quad (1)$$

3.1.1 Equação da parábola na forma polar

A Figura 7 apresenta a representação polar da equação parábola e ela mostra uma parábola genérica, com seus respectivos elementos: uma semi-reta auxiliar BC chamada de geratriz, o raio polar r que compreende a distância do ponto F (foco) ao ponto genérico A , ϕ o ângulo polar e f a distância focal. A equação em forma polar para essa parábola é dada por:

$$r = \frac{2f}{1 + \cos(\phi)} \quad (2)$$

Figura 7 - Elementos de uma parábola genérica



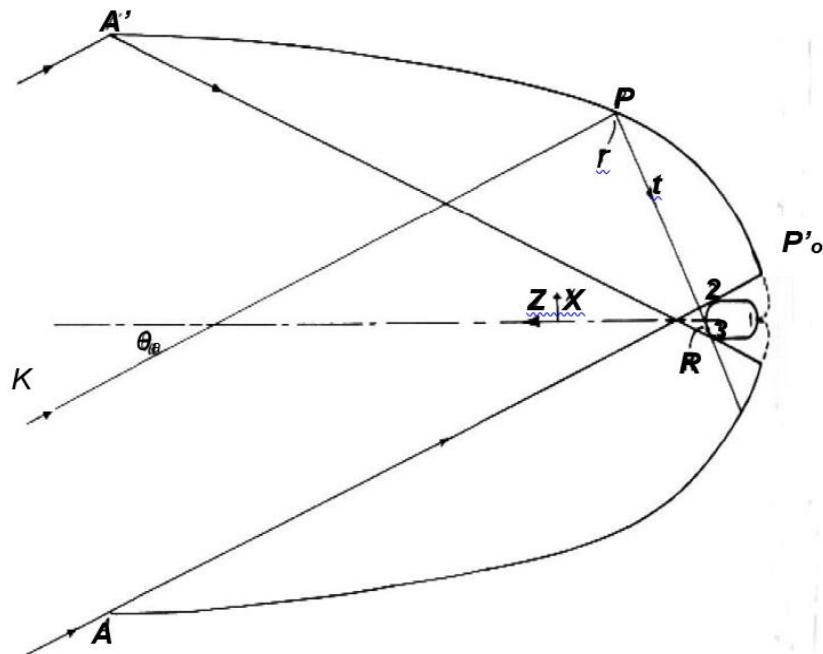
Fonte: Welford; Winton (1978).

Teoricamente, todo raio que atinge a parábola, converge para o foco F , dessa forma, os absorvedores dos concentradores parabólicos são colocados no foco, ou focos, de cada uma de suas parábolas.

3.1.2 Involuta – Generalização do princípio dos raios extremos para absorvedor não plano

A generalização do princípio dos raios extremos (Welford; Winston, 1978) para um absorvedor tubular genérico, secção não necessariamente circular, (Figura 8) diz que todos os raios que penetram no concentrador dentro de um ângulo coletor extremo θ_a deverão emergir tangentes ao absorvedor após uma reflexão.

Figura 8 – Generalização do princípio para absorvedor não-plano

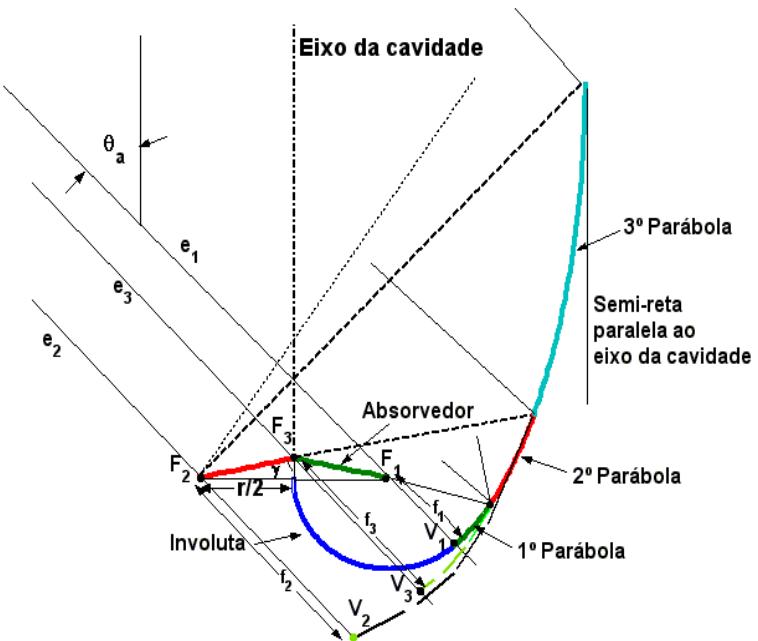


Fonte: Welford; Winton (1978)

3.1.3 Princípio de construção da cavidade refletora.

Os principais elementos de construção que compõe as curvas do CPC são mostrados na Figura 9 que exibe a parte direita da cavidade concentradora, a parte esquerda é simétrica. Os pontos F_1 , F_2 e F_3 são os vértices do absorvedor e também os focos das secções parabólicas, V_1 , V_2 e V_3 são os vértices das parábolas, e_1 , e_2 e e_3 são os eixos de simetria das parábolas e são os raios extremos que passam pelos focos, γ o semi-ângulo do vértice do absorvedor, $r/2$ é o segmento de reta que define a semi-base virtual do absorvedor e θ_a o ângulo de aceitação angular do CPC.

Figura 9 – Definição da construção da cavidade dos CPC



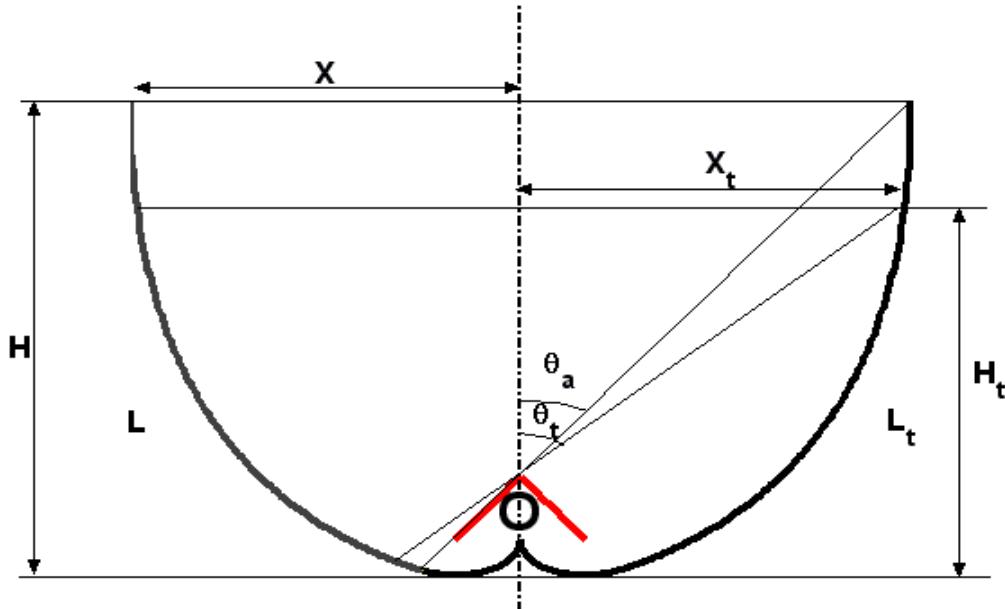
Fonte: Brandão (2004)

A Figura 10 mostra uma cavidade CPC com um dado ângulo de aceitação nas condições nominais e truncada.

A porção superior da superfície refletora é quase perpendicular à abertura e, desta forma, contribui muito pouco para a relação de concentração. Portanto, do ponto de vista da economia de material, a altura da cavidade pode ser significativamente reduzida (truncada), sem sacrifício do seu desempenho. Os parâmetros geométricos nominais da cavidade são vistos à esquerda e os parâmetros truncados à direita: H é a altura da cavidade, X a semi-abertura, L o semi-perímetro do refletor, θ_a o ângulo de aceitação nominal da cavidade. O subscrito t indica a condição de cavidade truncada.

É importante o conhecimento do comprimento da superfície refletora, da altura e do número médio de reflexões do CPC truncado, no qual este último impacta diretamente na eficiência e, consequentemente, na geração de energia do CPC. Portanto, a análise de custo-benefício do truncamento não é uma tarefa trivial, uma vez que requer uma verificação cuidadosa e simultânea do aspecto óptico e térmico do coletor (Brandão, 2004 apud Fraidenraich et al., 2011).

Figura 10 - Parâmetros da cavidade do CPC nas condições truncada (direita) e nominal (esquerda)



Fonte: Brandão (2004)

A parte superior do refletor, próxima à abertura é praticamente vertical, portanto a sua eliminação mediante um truncamento afeta muito pouco a largura da abertura e pode ser um elemento na otimização do CPC. Os efeitos do truncamento são:

- Menor perímetro do refletor;
- Aumento da aceitação da componente difusa;
- Menor número médio de reflexões e
- Menor relação de concentração.

O primeiro efeito tem consequência direta no custo do coletor, porque reduz a quantidade do material utilizado; o segundo e o terceiro efeito levam ao aumento da eficiência do equipamento, porque aumentam a fração de radiação que incide sobre o absorvedor, porém o quarto efeito vai em direção contrária, pois aumenta a superfície de perdas térmicas do coletor. A Figura representa o cerne da otimização geométrica desenvolvida neste trabalho e a base fundamental para o dimensionamento do sistema heliotérmico proposto. Ela é crucial, pois detalha as características construtivas do CPC e elucida as decisões de projeto que maximizam sua performance de captação solar para a aplicação de calor de processo.

1. Conceitos fundamentais ilustrados pela Figura 10: A figura distingue claramente entre um CPC em sua configuração nominal (ideal ou não truncada) e o CPC truncado, que é o foco da otimização neste estudo:

CPC Nominal: Um CPC ideal, concebido teoricamente, possui refletor que se estende até o ponto em que o raio marginal (com o ângulo de aceitação máximo) tangencia o absorvedor, sem que a luz se perca. Embora ideal em termos de captação total, essa configuração resulta em coletores de grande altura, volume de material e, consequentemente, custos de fabricação e montagem elevados, além de maior área exposta a perdas térmicas.

CPC Truncado: A Figura evidencia o CPC truncado, onde uma porção superior do refletor parabólico é removida. Esta é uma estratégia de otimização que visa um equilíbrio entre o desempenho óptico e a praticidade construtiva.

a) O truncamento permite:

- Redução de custo e volume;
- Diminuição da altura do coletor, reduzindo o material refletor e estrutural;
- Redução de perdas térmicas: Menor área superficial do coletor exposta ao ambiente, minimizando as perdas convectivas e radiativas;
- Manutenção da performance ótica: A remoção da parte superior do refletor causa uma perda mínima de radiação captada, uma vez que os raios que incidem nessa região contribuem pouco para a concentração ou são frequentemente bloqueados.

2. Parâmetros-chave e sua inter-relação:

A Figura também destaca os seguintes parâmetros, essenciais para a compreensão e o dimensionamento do CPC:

Ângulo de Aceitação (θ_a): Representa o maior ângulo de incidência solar a partir da normal do plano de abertura do coletor para o qual todos os raios que entram são concentrados no absorvedor. O truncamento do CPC afeta minimamente este ângulo, garantindo que o coletor ainda capte eficientemente a radiação solar em uma ampla faixa angular ao longo do dia e das estações, permitindo a operação estacionária ou com ajuste sazonal. No presente trabalho, o ângulo de aceitação foi otimizado, crucial para o desempenho do CPC nas condições de irradiação de [Caruaru/Porto Alegre].

Ângulo de Truncamento (θ_t): É o ângulo que define a porção do refletor que é removida. A otimização deste ângulo foi um ponto central da metodologia, buscando o ponto de inflexão onde a redução de material e perdas térmicas não comprometesse significativamente a energia concentrada. Este estudo identificou um ângulo de truncamento ótimo que garante a eficiência e a economicidade do design.

Altura do Refletor (H): A altura física do refletor (H), drasticamente reduzida pela otimização via truncamento para (H_t).

A largura do absorvedor, que neste trabalho é do tipo V invertido, otimizado para uma iluminação uniforme e eficiente transferência de calor.

3. Implicações da otimização por truncamento no desempenho do sistema: A otimização geométrica do CPC, conforme ilustrado na Figura, tem implicações diretas e positivas no balanço energético e na viabilidade técnica do sistema:

Eficiência Óptica Aprimorada: Embora uma porção do refletor seja removida, a perda de eficiência óptica é compensada pela redução das perdas térmicas e pela iluminação mais uniforme do absorvedor, especialmente no caso do absorvedor V invertido;

Redução de Custos de Capital - CAPEX: A menor necessidade de material refletor e estrutural reduz significativamente o custo de fabricação de cada unidade de CPC, tornando a solução mais competitiva;

Facilidade de fabricação, montagem e manutenção: Um coletor mais compacto e leve é mais fácil de ser produzido, transportado, instalado e mantido, reduzindo os Custos Operacionais (OPEX);

Viabilidade em Escala Industrial: A otimização geométrica torna o CPC uma solução mais atraente e viável para aplicações em larga escala, como a integração em usinas de biodiesel, onde o custo e a praticidade são fatores determinantes.

A compreensão profunda dos parâmetros ilustrados na Figura 10 é, portanto, essencial para entender como a otimização geométrica do CPC com absorvedor V invertido contribui para o sucesso da proposta de integração solar na indústria de biodiesel, representando uma das principais contribuições científicas e tecnológicas deste trabalho.

A eficiência ótica (η) de um CPC, com refletividade da superfície refletora maior que 0,75, pode ser bem aproximada mediante a expressão (Rabl;1976) :

$$\eta = \rho^{<n>} \quad (3)$$

Onde, ρ é o coeficiente de refletividade da superfície refletora (varia de acordo com as características do material empregado) e $<n>$ é o número médio de reflexões que um raio incidente sofre antes de atingir o absorvedor. Segundo Rabl o número médio de reflexões pode ser calculado por:

$$< n > = \frac{A_r}{A_a} E_d \quad (4)$$

Onde, A_r é a área da superfície refletora, A_a a área do absorvedor e E_d a fração de energia emitida por uma superfície refletora ideal (refletividade igual a 1) que atinge o absorvedor, pode ser expressa por:

$$E_d = \frac{1}{A_r} \int (1 - \sin(\theta')) ds \quad (5)$$

Sendo, ds o elemento de curva ao longo do refletor e θ' o ângulo entre o raio incidente e a normal à superfície refletora neste ponto ($\theta_a = \theta_i$). O número médio de reflexões para a cavidade concentradora é dado pela soma das contribuições parciais calculadas para cada uma das secções refletoras, como descritas acima. O número médio de reflexões para o CPC foi calculado, numericamente, mediante o uso das equações 3 a 5.

3.1.4 Direção dos concentradores solares

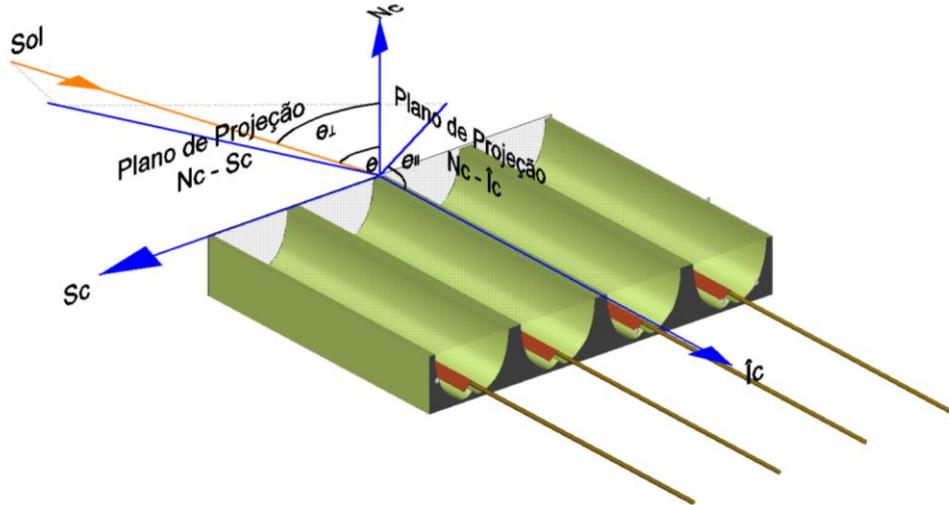
A Figura 11 mostra o coletor CPC e os ângulos de incidência solar projetados na direção transversal e longitudinal. Por conveniência, é definido o sistema de referência cartesiano do coletor por três versores:

N_C = define a direção normal à abertura do CPC;

\hat{l}_C = define a direção longitudinal do CPC;

S_C = define a direção transversal do CPC.

Figura 11 – Posicionamento espacial do CPC



Fonte: O Autor (2025)

O ângulo entre a normal ao coletor CPC, N_c , e o vetor raio de sol projetado no plano $N_c - S_c$, θ_\perp é dado, conforme Pinazo et al. (1992), por:

$$\operatorname{tg}(\theta_\perp) = S_c / N_c \quad (6)$$

O ângulo entre o versonor longitudinal do CPC, \hat{l}_c e o raio de sol projetado no plano $N_c - \hat{l}_c$, $\theta_{//}$ é dado por:

$$\operatorname{tg}(\theta_{//}) = I_c / N_c \quad (7)$$

Para o coletor CPC com absorvedor alinhado na direção Leste-Oeste (azimute zero) e ângulo em relação à horizontal local igual a β , o ângulo de incidência solar transversal, θ_\perp é dado por:

$$\operatorname{tg}(\theta_\perp) = \frac{(\cos \delta \operatorname{sen} \lambda \cos \omega) - (\operatorname{sen} \delta \cos \lambda - \operatorname{tg} \beta \operatorname{sen} \delta \operatorname{sen} \lambda) - (\operatorname{tg} \beta \cos \delta \cos \lambda \cos \omega)}{(\operatorname{sen} \delta \operatorname{sen} \lambda + \cos \delta \cos \lambda \cos \omega) + (\operatorname{tg} \beta \cos \delta \operatorname{sen} \lambda \cos \omega - \operatorname{tg} \beta \operatorname{sen} \delta \cos \lambda)} \quad (8)$$

O ângulo de incidência solar longitudinal, θ_{\parallel} é expresso por:

$$\operatorname{tg}(\theta_{\parallel}) = \frac{\operatorname{sen}\beta \cos \delta \operatorname{sen}\lambda \cos \omega - \operatorname{sen}\beta \operatorname{sen}\delta \cos \lambda + \cos \beta \operatorname{sen}\delta \operatorname{sen}\lambda - \cos \beta \operatorname{os}\delta \cos \lambda \cos \omega}{\cos \delta \operatorname{sen}\omega} \quad (9)$$

Para o caso particular onde a inclinação em relação a horizontal é igual à latitude ($\beta = \lambda$) as expressões acima se reduzem:

$$\operatorname{tg}(\theta_{\perp}) = -\frac{\operatorname{tg}\delta}{\cos \omega} \quad (10)$$

$$\operatorname{tg}(\theta_{\parallel}) = \frac{1}{\operatorname{tg}\omega} \quad (11)$$

A posição do absorvedor V invertido deve ter a face virada para o norte, pois será mais favorecido no inverno.

3.1.5 Fundamentos da energia aceita pelo CPC

Conceitos sobre energia solar importantes para a compreensão dos parâmetros físicos da energia do CPC gerada em forma de calor (Rabl,1976):

Radiação de feixe - A radiação solar recebida do sol sem ter sido espalhada pela atmosfera. (A radiação de feixe é muitas vezes referida como radiação solar direta; para evitar confusão entre subscritos para direta e difusa, usamos o termo radiação de feixe.)

Radiação difusa - A radiação solar recebida do sol, depois que sua direção foi alterada por espalhamento pela atmosfera. (A radiação difusa é referida em alguma literatura meteorológica como radiação do céu ou radiação do céu solar; a definição usada aqui é para distinguir a radiação solar difusa da radiação infravermelha emitida pela atmosfera).

Radiação solar total - A soma do feixe e da radiação solar difusa em uma superfície. (As medidas mais comuns de radiação solar são a radiação total em uma superfície horizontal, muitas vezes referida como radiação global na superfície);

Irradiância, W/m^2 - A taxa na qual a energia radiante incide em uma superfície por unidade de área de superfície. *Irradiação ou exposição radiante, J/m^2* - A energia incidente por unidade de área em uma superfície, encontrada pela integração da irradiância ao longo de um tempo especificado, geralmente uma hora ou um dia;

Insolação é um termo que se aplica especificamente à irradiação de energia solar. O símbolo H é usado para insolação por um dia. O símbolo I é usado para insolação por uma hora (ou outro período, se especificado);

Radiosidade ou Exitância Radiante, W/m^2 - A taxa na qual a energia radiante deixa uma superfície por unidade de área por emissão, reflexão e transmissão combinadas;

Potência emissiva ou autoexitância radiante, W/m^2 - A taxa na qual a energia radiante deixa uma superfície por unidade de área apenas por emissão. Constante Solar (Unidade da radiação solar extraterrestre é igual a $1353 W/m^2$).

Qualquer um desses termos de radiação, exceto insolação, pode se aplicar a qualquer faixa de comprimento de onda especificada (como o espectro de energia solar) ou à radiação monocromática. A insolação refere-se apenas à irradiação no espectro da energia solar.

Para calcular a energia gerada pelo CPC truncado, Brandão (2004), utilizou-se a irradiação solar horária no plano do coletor para todas as horas e 365 dias do ano, foi calculada conforme a metodologia de geração de séries temporais sintéticas de radiação solar diária, Aguiar et al., (1988), utilizando as correlações de Collares-Pereira et al (1979).

Os parâmetros de entrada foram a *Radiação Solar Global Diária, Média Mensal Incidente (I_G)*, extraídas do *Atlas Solarimétrico do Brasil*, com esse parâmetro, simplificou-se a aquisição, tornando universal a aplicação do CPC, sem prévio conhecimento de outros parâmetros sazonais locais. A conversão dos valores de irradiação no plano horizontal para os planos inclinados é calculada segundo o método de Liu & Jordan (1962) isotrópico estendido por Klein (1981).

A radiação solar direta incidente no CPC pode ser expressa por (Carvalho et al., 1987):

$$I_b^c = I_b^n \cos(\theta_i) K(\theta_i) F(\theta_{\perp}) \quad (12)$$

Onde, I_b^n é a radiação solar direta horária normal; θ_i o ângulo de incidência solar; θ_{\perp} a projeção transversal do ângulo de incidência solar; K o modificador de ângulo de incidência e F a função de aceitação angular do CPC.

A função de aceitação angular é definida como a fração dos raios incidentes sobre a abertura com ângulo θ que se propagou através da cavidade e incidiu

finalmente no absorvedor. É uma propriedade meramente geométrica e não inclui as possíveis absorções no refletor. Para um CPC ideal (não-truncado) a função de aceitação angular é dada por:

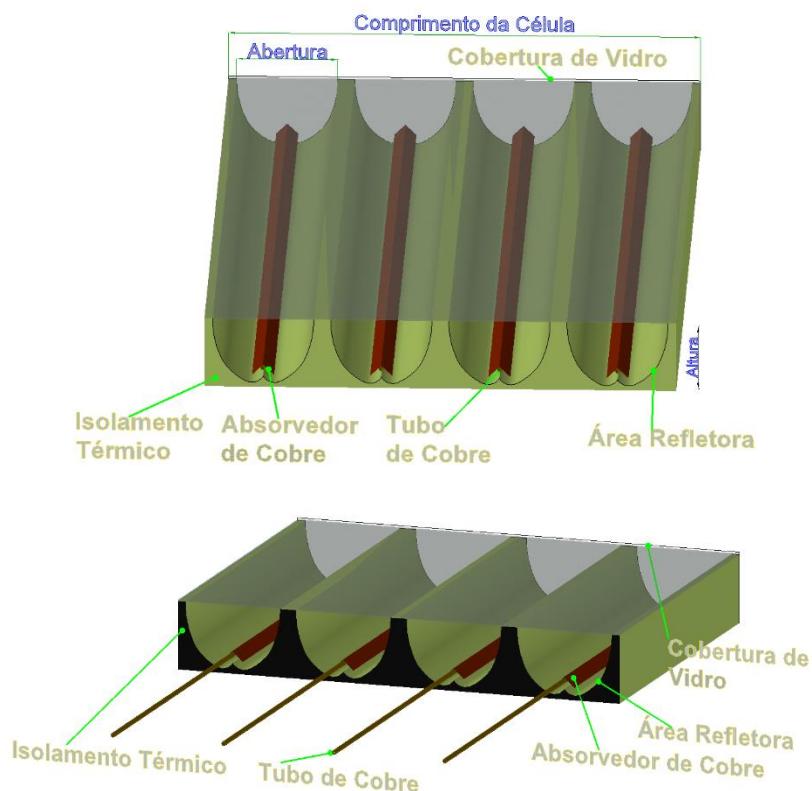
$$\begin{cases} F(\theta) = 1 & \text{se } |\theta| \leq \theta_a \\ F(\theta) = 0 & \text{se } |\theta| > \theta_a \end{cases} \quad (13)$$

Como um modificador de ângulo de incidência pode ser adotado a expressão dada por Rabl (1981):

$$K(\theta_i) = (1 - 2,02 \cdot 10^{-5}) \cdot (\theta_i^2 + 4,69 \cdot 10^{-7}) \cdot (\theta_i^3 - 1,80 \cdot 10^{-8}) \cdot \theta_i^4 \quad (\theta_i \text{ em radianos}) \quad (14)$$

A Figura 12 mostra os elementos de composição de uma célula do CPC com absorvedor V invertido.

Figura 12 - Representação de um CPC de absorvedor V invertido.



Fonte: O Autor (2024)

3.2 PROCESSOS E OPERAÇÃO DE UMA USINA DE BIODIESEL

O óleo vegetal é utilizado como precursor do biodiesel e geralmente extraído da oleaginosa por processo mecânico. Bellaloui (2015) sugeriu que esta forma de extração mecânica é mais econômica e ecologicamente mais viável, pois, pelo sistema convencional, o óleo é parcialmente extraído por prensas contíguas e, em seguida, submetido à extração com solventes orgânicos que deixam resíduos e efluentes no meio ambiente, reforçando, afirmou que a prensagem mecânica, sob alta pressão, reduz o conteúdo de óleo na torta a 5%, o que dispensa a subsequente extração por solvente. No caso do caroço de algodão, eles são descarregados por meio de caminhões, depois, limpos por meio de peneiramento (peneira vibratória) e sucção de ar. A etapa de extrusão representa o ponto crucial desse tipo de processo, onde a extrusora faz com que os grãos sejam desintegrados sobre temperatura e pressão. Neste processo, as bolsas de óleo que existem no grão são rompidas facilitando a prensagem. Na prensagem da polpa de algodão é obtido o óleo bruto, e com isso também é obtido o farelo, que nada mais é do que os restos das etapas para o processamento do óleo. Em seguida, o farelo passa por um resfriador rotativo, para possibilitar a sua armazenagem à temperatura ambiente e por um moinho de martelos, cuja função é moer ainda mais o produto. O farelo cai num silo para o controle de fluxo; o diferencial na extração mecânica de óleo a frio é a qualidade superior de produtos, além de ser um sistema corretamente ecológico, pois não polui a atmosfera, dispensa o tratamento de efluentes e é mais seguro (Bellaloui, 2015). O Quadro 1 especifica o maquinário e respectivas potências de um processo industrial de extração de óleo vegetal.

Quadro 1 – Elementos do processamento de óleo de algodão (NBR 5410 e NBR-5444)

Equipamento	Potência
1) Transportador de recebimento dos grãos por fuso transportador	3 cv
2) Silo de grãos com fuso transportador horizontal de 5m	2 cv
3) Transportador vertical de 2,20 m	2 cv
4) Peneira vibratória	3 cv
5) Fuso transportador para moinho martelo	2 cv
6) Moinho martelo	5 cv
7) Elevador de caneca para o pré-aquecedor de grãos cozinhador	3 cv
8) Segunda linha com elevador de caneca para o pré-aquecedor	5 cv
9) Prensa 1 de capacidade 400kg/hora	20 cv
10) Prensa 2	3 cv
11) Fuso transportador de torta 1	2 cv
12) Fuso transportador de torta 2	2 cv
13) Bomba para transporte ao tanque pulmão	2 cv
14) Tanque pulmão armazenador óleo bruto	2 cv
15) Degomador tipo agitador	3 cv
16) Tanque de preparo de soda cáustica (NaOH)	1 cv
17) Neutralizador, dependendo do tipo de óleo, degoma ou neutraliza	3 cv
18) Bomba do degomador para o filtro prensa	1,5 cv
19) Filtro prensa 1, vai para o tanque pulmão de óleo filtrada	1.5 cv
20) Filtro prensa 2, do neutralizador, bomba	4 cv
21) Tanque pulmão	-
22) Pré-aquecedor	-
23) Desumidificador, bomba centrífuga	3 cv
24) Bomba à vácuo	3 cv

Fonte: O Autor (2016)

O processo mecânico é fundamentalmente a extrusão e prensagem, sem a utilização de caldeira ou produto químico, mas sim por pressão e elevando a temperatura por atrito, valorizando a matéria-prima (Bellaloui, 2015).

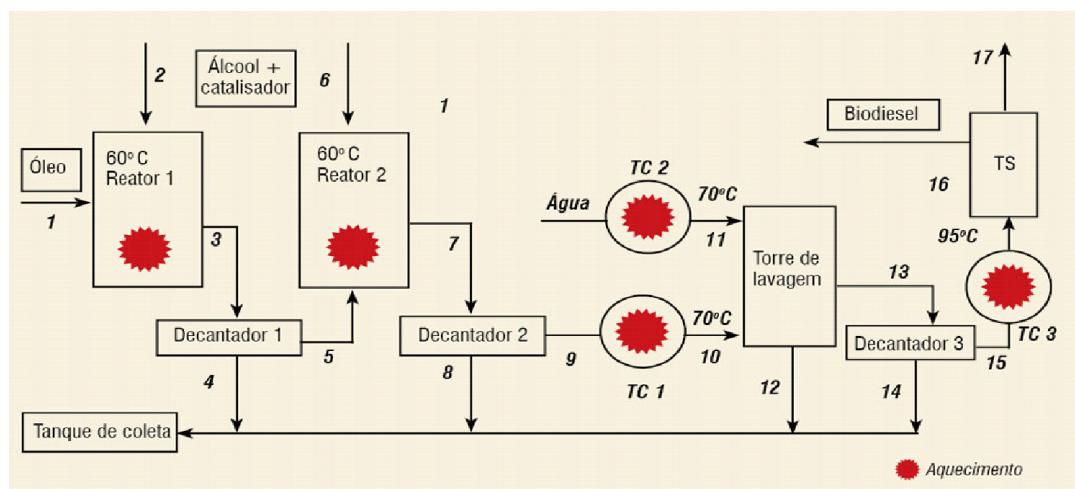
O processo inicia com o recebimento da matéria-prima, no caso do caroço de algodão, eles são descarregados por meio de caminhões em uma moega e armazenados em um silo de grande capacidade, podendo, às vezes, ficar armazenados durante dias, dependendo do fluxo de produção. Em seguida, os caroços são limpos por meio de peneiramento (peneira vibratória) e sucção de ar. Esta é uma etapa muito importante, pois garante a qualidade do linter e ainda protege as deslintadeiras de desgaste precoce.

3.3 PRODUÇÃO DE BIODIESEL TRANSESTERIFICADO PARA ESTIMATIVA DE BALANÇO ENERGÉTICO E TROCADOR DE CALOR

O princípio básico da transesterificação é a separação do *glicerol* do *triglicerídeo* através da utilização de álcool. Este processo é realizado por duas rotas: etílica ou metílico. O principal motivo para utilização de álcool é deslocar o equilíbrio da reação, onde óleo (*triglicerídeo*) reage com álcool, para formar biodiesel (ésteres), ou seja: $1\text{Óleo} + 3\text{Álcool} \longleftrightarrow 3\text{Biodiesel} + 1\text{Glicerina}$. Embora a transesterificação metílica seja o processo mais utilizado, a rota adotada deve ser adaptada a cada realidade (Costa et al., 2013).

É necessário identificar o consumo térmico e elétrico para realizar o balanço de energia, o esquema integrado da Figura 13, idealizado por Tapasvi et al. (2007) mostra uma planta de processamento de biodiesel, com pontos de consumo térmico. Paralelamente, existe consumo de energia elétrica devido ao uso dos motores das máquinas e transporte do material (correntes indicadas pelas setas de 1 a 17). A energia elétrica é calculada considerando a energia consumida em função da potência dos motores pelo tempo de utilização de cada um deles.

Figura 13 – Esquema térmico simplificado da produção de biodiesel.



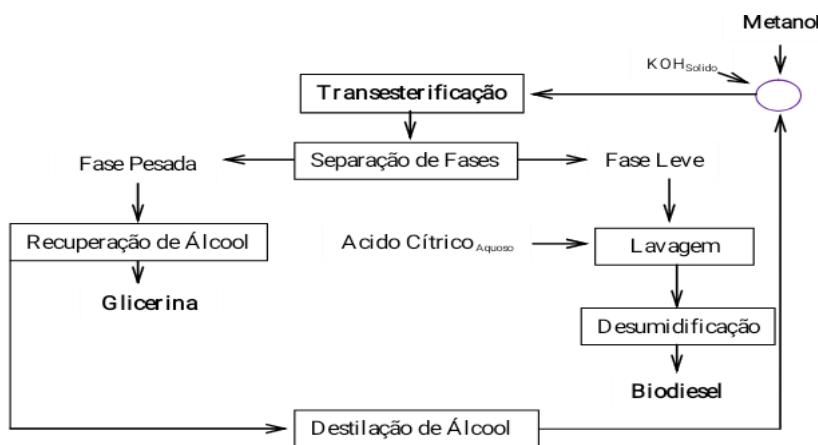
Fonte: Tapasvi et al. (2007)

Em suma, recomenda-se que o procedimento básico para captar a energia consumida, por cada equipamento, deve ser medida por instrumentos eletrônicos de precisão e a energia utilizada constitui no somatório do produto da potência das máquinas com o tempo de término de cada processo.

3.3.1 Processo para transesterificação de biodiesel

No processo de produção de biodiesel utilizam-se catalisadores (KOH, NaOH e H_2SO_4), com o objetivo de facilitar/acerlar as reações. Em relação ao álcool, pode-se utilizar tanto o etanol como o metanol. No Brasil, atualmente, a vantagem na utilização do etanol para a produção do biodiesel está na grande oferta deste álcool em seu território. O processo simplificado de produção na Usina de Caetés é descrito (Figura 14).

Figura 14 - Fluxograma resumido do processo da produção de Biodiesel.



Fonte:Modificado de Campos (2009)

Sob o ponto de vista ambiental, o uso do etanol (obtido a partir de fontes renováveis) leva vantagem sobre o metanol (geralmente obtido a partir do petróleo).

O processo inicia-se com a preparação da matéria prima, por filtração e secagem do óleo. A seguir ocorre a reação de transesterificação, com adição ao óleo da mistura de álcool com catalisador. Em seguida realiza-se a separação de fases, ocorrendo à decantação da glicerina e sua separação da mistura de ésteres. Na sequência procede-se a recuperação e a desidratação do álcool. Por fim, ocorre a purificação dos ésteres, com três lavagens, secagem e posterior filtração. O valor do rendimento bruto do processo de produção é de grande importância e representa, a razão entre a massa de combustível produzida e a quantidade de óleo utilizada. O objetivo é encontrar o maior valor possível, pois significa um melhor aproveitamento da matéria prima. Geralmente, a eficiência térmica dessas usinas não é expressa da mesma forma que as usinas térmicas convencionais. Detalhes do processo e equipamentos da produção de biodiesel da Usina de Caetés são tratados no APÊNDICE.

3.3.2 Conceito e fundamentação Matemática de Trocadores de Calor de Casco e Tubos

Consiste em um casco externo e um feixe de tubos internos. Um dos fluidos circula dentro dos tubos, enquanto o outro fluido circula pelo lado externo dos tubos, no espaço entre o casco e os tubos. Os dois fluidos (água e óleo térmico) entram em contato com a superfície dos tubos, ocorrendo uma diferença de temperatura. Essa diferença de temperatura gera um fluxo de calor do fluido mais quente, para o fluido mais frio. Assim, o calor é conduzido através da parede dos tubos, transferindo-se do fluido quente para o fluido frio. A transferência de calor é determinada pela convecção dos fluidos, tanto dentro dos tubos quanto no espaço entre o casco e os tubos. Serão aplicados ao aquecimento de óleo térmico (dentro dos tubos) a partir da energia solar térmica captada pelos aparelhos (água aquecida no casco).

Os *Trocadores de Calor de Casco e Tubos -TCT* são elementos ubíquos na engenharia de processos, indispensáveis para a otimização energética e controle térmico em vastas aplicações industriais. Sua concepção exige uma compreensão aprofundada dos fenômenos de transporte de calor e das interações *fluído-dinâmicas*, culminando em uma abordagem de dimensionamento que integra princípios termodinâmicos e mecânicos. Esta seção visa elucidar os conceitos fundamentais e as equações governantes que permitem o dimensionamento e a análise de desempenho de *TCTs*.

a) Princípios Fundamentais de Operação e Equação Geral da Transferência de Calor: Um TCT facilita a troca de energia térmica entre dois fluidos a diferentes temperaturas, separados por uma barreira sólida (os tubos). A transferência de calor ocorre por convecção em ambos os lados do tubo e por condução através da parede do tubo. A equação geral que governa essa transferência de calor é:

$$Q = UA_{Troca}(LMTD) \quad (15)$$

Onde:

Q - Taxa de transferência de calor (W ou Btu/h).

U - Coeficiente global de transferência de calor (W/(m². K) ou Btu/ (h.ft².°F)).

A_{Troca} - Área de troca térmica (m² ou ft²).

$LMTD$ - Média logarítmica de temperatura (°C, K, °F ou R).

b) Componentes Estruturais Essenciais: Conforme detalhado anteriormente, os componentes chave incluem o casco, o feixe tubular, os espelhos, os cabeçotes, as chicanas e os tirantes/espaçadores. O arranjo desses componentes determina as características geométricas essenciais para o cálculo da área de troca e das perdas de carga.

c) Classificações Típicas (TEMA Standard): As classificações da Tubular Exchanger Manufacturers Association - TEMA são cruciais para a padronização e a seleção da geometria do TCT, impactando diretamente os cálculos. A escolha do tipo TEMA (Ex: BEM, AES, CFU) define a configuração dos cabeçotes, casco e feixe tubular, influenciando aspectos como acessibilidade para manutenção e o regime de expansão térmica diferencial.

d) Diferença de Temperatura Média Logarítmica (ΔT_{ml} ou LMTD): A força motriz para a transferência de calor em um TCT é a diferença de temperatura. Para escoamento em contracorrente e concorrente, a DTML é definida por:

$$\Delta T_{ml} = \frac{(T_{QE} - T_{FS}) - (T_{QS} - T_{FE})}{\ln\left(\frac{T_{QE} - T_{FS}}{T_{QS} - T_{FE}}\right)} \quad (\text{Para contracorrente}) \quad (16)$$

$$\Delta T_{ml} = \frac{(T_{QE} - T_{FE}) - (T_{QS} - T_{FS})}{\ln\left(\frac{T_{QE} - T_{FE}}{T_{QS} - T_{FS}}\right)} \quad (\text{Para concorrente}) \quad (17)$$

Onde, T_{QE} e T_{QS} são as temperaturas de entrada e saída do fluido quente, T_{FE} e T_{FS} são as temperaturas de entrada e saída do fluido frio. Para fluxos cruzados ou múltiplos passes, um fator de correção F é aplicado à DTML do contracorrente:

$$\Delta T_{ml} = F(\Delta T_{ml}) \quad (\text{Contracorrente}) \quad (18)$$

O fator F é obtido a partir de gráficos ou equações que dependem dos números de passes e das temperaturas de entrada e saída.

e) Coeficiente Global de Transferência de Calor (U): O coeficiente global U integra as resistências à transferência de calor de ambos os fluidos e da parede do tubo, incluindo os efeitos de incrustação (*fouling*). Para um tubo limpo, U_c , referido à área externa do tubo (A_o), é dado por:

$$\frac{1}{U_c A_0} = \frac{1}{h_i A_i} + \frac{\ln(D_o / D_i)}{2\pi k L} + \frac{1}{h_o A_0} \quad (19)$$

Onde:

h_i e h_o - Coeficientes de convecção internos e externos ($\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$).

A_i e A_o - Áreas de superfície interna e externa (m^2).

D_i e D_o - Diâmetros interno e externo do tubo (m).

k - Condutividade térmica do material do tubo ($\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$).

L - Comprimento do tubo (m)

f) Fatores de Incrustação (R_f): A presença de incrustações nas superfícies de troca adiciona resistências térmicas. O coeficiente global de transferência de calor com incrustação, U_d (dirty), é calculado como:

$$\frac{1}{U_d A_0} = \frac{1}{h_i A_i} + \frac{R_{fi}}{A_i} \frac{\ln(D_o/D_i)}{2\pi k L} + \frac{R_{fo}}{A_0} + \frac{1}{h_0 A_0} \quad (20)$$

Onde R_{fi} e R_{fo} são os fatores de incrustação internos e externos ((m². K)/W) ou ((h. ft². °F)/Btu). Estes valores são empíricos e dependem do tipo de fluido, temperatura e histórico de operação.

g) Coeficientes de Convecção (h_i , h_o): Os coeficientes de convecção são determinados por correlações empíricas que dependem das propriedades do fluido (densidade, viscosidade, condutividade térmica, calor específico), da velocidade do fluxo e da geometria do canal. Para escoamento turbulento no interior dos tubos (lado dos tubos), a correlação de Dittus-Boelter é comumente utilizada:

$$Nu = 0,023 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^n \quad (21)$$

Onde $Nu = \frac{h_i D_i}{k}$ (Número de Nusselt), $Re = \frac{\rho v D_i}{\mu}$ e $Pr = \frac{C_p \mu}{k}$ (Número de Prandt). O expoente n é 0,4 para aquecimento do fluido e 0,3 para resfriamento. Para o lado do casco, correlações como as de Kern ou Bell-Delaware são empregadas, considerando o complexo fluxo cruzado e as chicanas.

h) Perda de Carga (ΔP): A perda de carga em cada lado do trocador é calculada para dimensionar as bombas. Para o lado dos tubos:

$$\Delta P_{Tubos} = Np(4f \frac{L}{D_i} \frac{\rho v^2}{2} + K \frac{\rho v^2}{2}) \quad (22)$$

Onde Np é o número de passes nos tubos, f é o fator de atrito de Fanning, L é o comprimento do tubo, D_i é o diâmetro interno, ρ é a densidade do fluido, v é a velocidade média do fluido e K é o coeficiente de perda de carga devido às entradas e saídas. Para o lado do casco, as correlações são mais complexas devido à geometria do fluxo (como as de Kern ou Bell-Delaware), que consideram as chicanas e as áreas de fluxo cruzado e de bypass.

i) Área de Troca Térmica (A): A área total de troca térmica é um parâmetro de dimensionamento fundamental, diretamente relacionado ao número e ao tamanho dos tubos. Para um trocador com N_t tubos de diâmetro externo D_o e comprimento L :

$$A = N_t \cdot \pi \cdot D_o \cdot L \quad (23)$$

O número de tubos é determinado pela área de passagem requerida e pela geometria do feixe (*pitch* dos tubos, arranjo).

j) Vibração Induzida por Fluxo: Embora não diretamente quantificada por uma equação de projeto primário, a vibração dos tubos é um aspecto crítico do dimensionamento mecânico. Métodos analíticos para prever frequências naturais dos tubos e comparar com frequências de excitação (Ex: *vortex shedding*) são empregados para determinar espaçamentos ótimos de chicanas. A frequência natural de um tubo pode ser aproximada por:

$$f_n = C \sqrt{\frac{E \cdot I}{\rho A_t L^4}} \quad (24)$$

Onde C é uma constante que depende das condições de contorno, E é o módulo de elasticidade, L é o momento de inércia da seção transversal do tubo, ρ é a densidade do tubo, A_t é a área da seção transversal do tubo e L é o comprimento do tubo entre suportes (chicanas).

k) Métodos de Dimensionamento e Análise (LMTD e ε -NTU):

- Método *Log Mean Temperature Difference* - *LMTD*: Utilizado para o projeto (*design*). A partir das vazões e temperaturas de entrada/saída desejadas e com base nos coeficientes de convecção e fatores de incrustação, calcula-se a área de troca A necessária via $Q = U \cdot A \cdot F \cdot \Delta T_{ml}$, *contracorrente*.
- Método ε -*NTU* (Efetividade-Número de Unidades de Transferência): Empregado na análise (*rating*) de um trocador existente. Com a área A e o U conhecidos e as temperaturas de entrada, calcula-se a efetividade (ε) do trocador (razão entre a taxa de transferência de calor real e a máxima possível). A efetividade está ligada

ao Número de Unidades de Transferência (NTU), onde $NTU = \frac{UA}{C_{\min}}$ e C_{\min} é a capacidade calorífica mínima ($C_p \cdot \dot{m}$).

I) Aplicações Industriais e Otimização: A otimização de TCTs visa maximizar a eficiência térmica com o menor custo de capital e operacional. Isso envolve a seleção de materiais, arranjos de fluxo e, principalmente, a geometria das chicanas (tipo, corte e espaçamento) e o padrão de disposição dos tubos, que afetam diretamente o U e o ΔP .

m) Cálculo de Q para aquecimento:

É a quantidade de energia necessária para elevar a temperatura de uma massa específica de um fluido (massa mássica), com um calor específico conhecido (c_p) por determinado diferencial de temperatura (ΔT). Sensível, pois é o calor que causa uma mudança de temperatura no fluido, sem mudança de fase. Geralmente, este parâmetro se refere à demanda térmica em um ponto específico do processo ou uma única etapa: Por exemplo: calor necessário para aquecer a corrente de óleo de 30° para 80° na entrada do reator.

Gradiente de temperatura do óleo (°C)

$$\Delta T_{\text{Óleo}} = T_{\text{ÓleoSaída}} - T_{\text{ÓleoEntrada}}$$

Carga térmica

(W)

$$Q = m_{\text{óleo}} c p_{\text{óleo}} \Delta T_{\text{Óleo}}$$

n) Cálculo da média logarítmica de temperatura (LMTD):

$$\theta_1^o C = T_{\text{EntradaÁgua}} - T_{\text{SaídaÓleo}}$$

$$\theta_2^o C = T_{\text{SaídaÁgua}} - T_{\text{EntradaÓleo}}$$

$$LMDT = \left(\frac{\theta_1 - \theta_2}{\ln \frac{\theta_1}{\theta_2}} \right)$$

o) Cálculo dos coeficientes h_i e h_o (W/m².K):

Fluido que percorre o interior dos tubos

$$Vz_{\text{Óleo}} = \frac{m_{\text{óleo}}}{\rho_{\text{óleo}}} (m^3/s)$$

$$V_{\text{Óleo}} = \frac{Vz_{\text{Óleo}}}{A_{\text{total}}} (\text{m/s})$$

$$\text{Re}_{\text{Óleo}} = \frac{\rho_{\text{Óleo}} V_{\text{Óleo}} D_i}{\mu c_{\text{Óleo}}}$$

$$\text{Pr}_{\text{Óleo}} = \frac{cp_{\text{Óleo}} \mu c_{\text{Óleo}} D_i}{k_{\text{Óleo}}}$$

$$h_i = \frac{Nu_{\text{Óleo}} k_{\text{Óleo}}}{D_i} (\text{W/m}^2\text{K})$$

Fluido que percorre o externo do tudo – (casco)

Velocidade de circulação estimado (m/s)

$$\text{Re}_{\text{Água}} = \frac{\rho_{\text{Água}} V_{\text{Água}} D_o}{\mu c_{\text{Água}}}$$

$$\text{Pr}_{\text{Água}} = \frac{cp_{\text{Água}} \mu c_{\text{Água}}}{k_{\text{Água}}}$$

$$Nu_{\text{Água}} = 0,27 \cdot \text{Re}_{\text{Água}}^C \cdot \text{Pr}_{\text{Água}}^m$$

$$h_o = \frac{Nu_{\text{Água}} \times k_{\text{Água}}}{D_o} (\text{W/m}^2\text{K})$$

p) Dimensionamento da área de troca(A_{Troca} em m²) e comprimento por tubo

(L_{estimado} em m):

$$A_{\text{Troca}} = \frac{Q}{U \cdot LMDT \cdot F}$$

$$L_{\text{estimado}} = \frac{A_{\text{Troca}}}{\pi D_0 N_t}$$

q) Efetividade térmica do trocador de calor:

Foram integrados conceitos fundamentais, descrições aprofundadas dos componentes estruturais, classificações segundo normas TEMA, arranjos de fluxo, seleção de materiais e, crucialmente, as equações governantes que fundamentam o dimensionamento e a análise de desempenho, incluindo o coeficiente global de transferência de calor U , fatores de incrustação (R_f), perda de carga ΔP , e os métodos $LMTD$ e ε - NTU .

$$\varepsilon = \frac{Q_{real}}{Q_{Max}}$$

Obs.: Modelos computacionais e ferramentas Computer-Aided Engineering - CAE são amplamente utilizados para simular e otimizar esses complexos balanços.

4 METODOLOGIA UTILIZADA

Neste capítulo será apresentada a metodologia para o traçado da cavidade refletora do CPC com absorvedor V invertido completamente iluminado, as definições de sua otimização, método de truncamento e energia gerada para escolha do concentrador *Padrão*. Posteriormente, as informações referentes a usina de biodiesel e seu potencial de produção, a descrição da realização das aferições da energia do processo de esmagamento da oleaginosa e transesterificação para obtenção de biodiesel de algodão, através de um balanço energético de toda produção, complementando com a memória de cálculos do método de integração do sistema solar com a usina de biodiesel, por um trocador de calor de casco e tubos.

4.1 INTRODUÇÃO AOS MÉTODOS

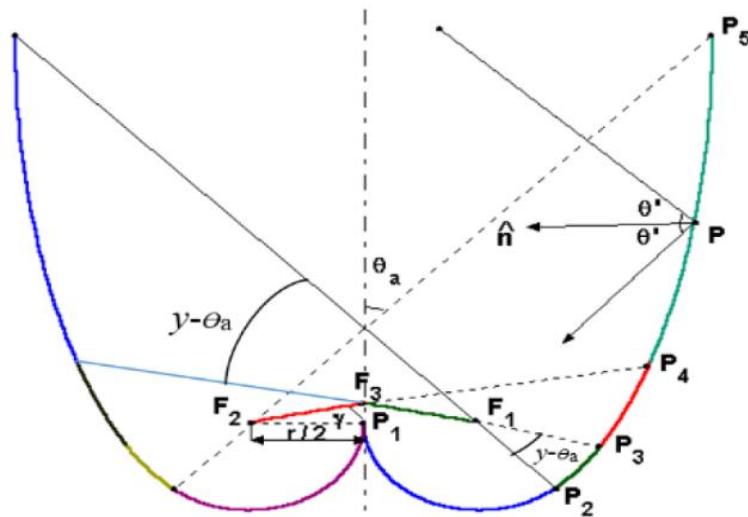
A metodologia desenvolvida, abrangendo a modelagem do coletor solar, o balanço energético da usina e o projeto de integração, foi inteiramente fundamentada em trabalhos clássicos e metodologias consagradas na literatura. Para a modelagem e otimização do Coletor Parabólico Composto (CPC), foram utilizados os princípios fundamentais da ótica *não-imageadora* de Rabl (1976) e Welford & Winston (1978), as equações de construção para o absorvedor em V invertido de Brandão et al. (2004), e as correlações para geração de dados de irradiação de Collares-Pereira et al. (1979) e Aguiar et al. (1988).

A análise de balanço energético da usina seguiu o arcabouço conceitual de Bueno et al. (2010) e Risoud (1999), enquanto as medições empíricas de consumo de energia aderiram à norma técnica internacional IEC 1159. Finalmente, o dimensionamento do sistema de integração, notadamente o trocador de calor, foi realizado com base nas equações clássicas da transferência de calor, conforme apresentado em obras de referência como Incropera et al. (2007) e Duffie & Beckman (2013). A adoção destas referências-chave em cada etapa, assegurou o rigor e a validade dos procedimentos e resultados subsequentes.

4.1.1 Superfície refletora do CPC

A Figura 15 ilustra a descrição da construção da curva da cavidade refletora do CPC com absorvedor V invertido, completamente iluminado (sem truncamento). O arco de circunferência (P_1-P_2), que é o primeiro trecho da cavidade, tem seu centro em F_1 é a involuta ao absorvedor.

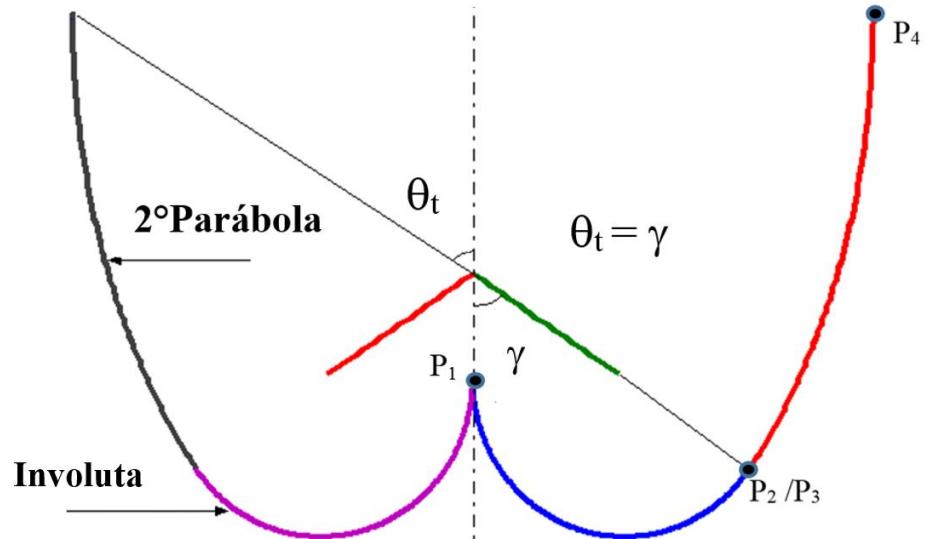
Figura 15 - CPC não Truncado.



Fonte: Brandão (2004)

A primeira secção refletora parabólica ($P_2 - P_3$) com foco em F_1 começa no final da involuta (ponto P_2) e vai até onde intercepta o segmento de reta ($F_3 - F_1$). A segunda secção parabólica ($P_3 - P_4$), com foco em F_3 , inicia-se em P_3 e termina onde intercepta o segmento de reta ($F_2 - F_3$). Finalmente a terceira secção parabólica ($P_4 - P_5$), com foco em F_2 inicia-se em P_4 e termina quando intercepta o raio extremo que passa por F_2 . As distâncias focais das secções parabólicas foram determinadas aplicando-se a condição de continuidade da curva refletora nos pontos P_2 , P_3 e P_4 (observa-se que a tangente das parábolas no ponto comum, fim de uma curva e início da seguinte, terão a mesma derivada, o mesmo ângulo de inclinação em relação à horizontal). Como pode ser visto na Figura 25, a abertura angular de construção destas duas parábolas (pontos: P_2-P_3 e P_4-P_5) é a diferença $\gamma - \theta_a$, caso $\gamma = \theta_a$ ambas não existirão, o que resulta uma configuração *truncada* (Figura 16).

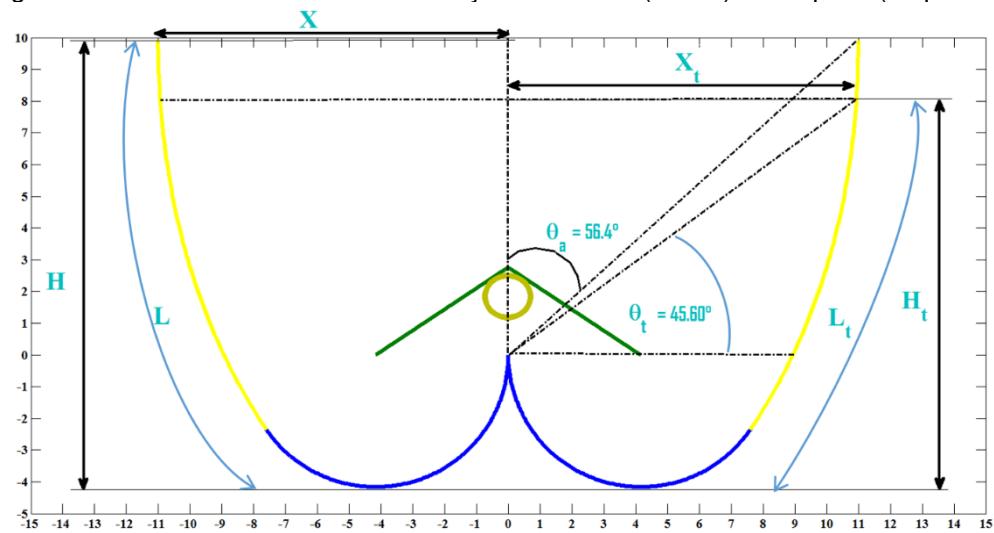
Figura 16 – Perfil do CPC após o truncamento



Fonte: O Autor (2024)

Observando a Figura 17, notamos que a porção superior da superfície refletora do CPC é quase perpendicular à abertura e contribui muito pouco para a sua relação de concentração.

Figura 17 - Cavidade do CPC nas condições truncada (direita) e completa (esquerda).



Fonte: O Autor (2024)

As equações para determinação dessas cavidades e número médio de reflexões foram descritas por *Fraidenraich* (2003)¹, são mostradas nas equações abaixo:

Esta otimização é denominada de geométrica, tendo, como consequência, uma alteração no número de reflexões de sua área de concentração (otimização ótica).

a) Involuta (secção P_1P_2)

$$x = \frac{r}{2} [1 + \cos(\phi)] \quad ; \quad y = \frac{r}{2} \sin(\phi) \quad (25)$$

Onde,

$$\pi \leq \phi \leq (\theta_a + 3\pi/2)$$

Número médio de reflexões na involuta:

$$\langle n \rangle = \frac{1}{4} (\pi/2 + \theta_a) \sin(\gamma)$$

Onde, r é o raio vetor e ϕ o ângulo formado entre o raio vetor e o eixo da parábola que está inclinado de θ_a em relação ao eixo da cavidade e γ semi-ângulo de vértice do absorvedor.

b) Segunda 2º Parábola (secção P_3P_4)

$$x = \frac{2f_2}{1 + \sin(\theta_a - \phi)} \cos(\phi) \quad ; \quad y = \frac{r \cos(\gamma)}{2 \sin(\gamma)} + \frac{2f_2}{1 + \sin(\theta_a - \phi)} \sin(\phi) \quad (26)$$

$$f_2 = \frac{r}{2} \left[1 + \frac{1 + \cos(\gamma - \theta_a)}{2 \sin(\gamma)} \right], \text{ (distância focal)} \quad (27)$$

¹ FRAIDENRAICH, N. Derivação das propriedades geométricas e óticas de concentradores tipo CPC com absorvedor V invertido. Notas de aula, 2003.

Onde,

$$(\gamma + 3\pi/2) \leq \phi \leq (\pi/2 - \gamma)$$

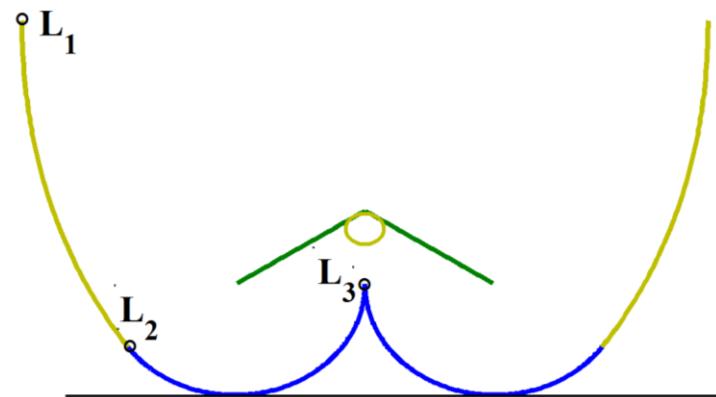
Número médio de reflexões na segunda secção parabólica:

$$\langle n \rangle = \frac{A_r}{A_a} - \left\{ \frac{2f_2 \left[\frac{\cos(\gamma - \theta_a)}{1 + \cos(\gamma - \theta_a)} - \frac{\cos(\alpha)}{1 + \cos(\alpha)} \right]}{A_a} \right\} \quad (28)$$

Onde, o comprimento da superfície refletora (Figura 18), perímetro da seção transversal do refletor ($L_{total} = 2(L_1 + L_2 + L_3)$) pode ser facilmente calculado usando a expressão geral. Onde r e ϕ são coordenadas polares e o índice (i) indica o início de uma dada seção refletora, seja circular ou parabólica. O elemento f representa a distância focal de cada seção parabólica. O comprimento total da superfície refletora será dado por $\Sigma 2L_i$.

$$L_i = \int_{\phi_i}^{\phi_{i+1}} dr \left[r^2 + (dr/d\phi)^2 \right]^{1/2} \quad \text{ou} \quad L_i = 2^{3/2} f \int_{\phi_i}^{\phi_{i+1}} \frac{d\phi}{(1 + \cos(\phi))^{3/2}} \quad (29)$$

Figura 18 – Representação do comprimento da superfície refletora



Fonte: O Autor (2024)

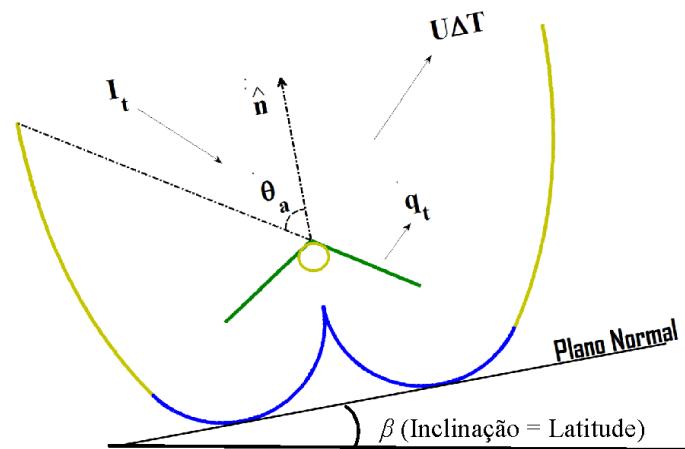
4.1.2 Método para cálculo da energia gerada pelo CPC

Como se trata de um balanço, existem compensações e o coeficiente de perdas térmicas do coletor CPC foi aproximado por uma curva empírica derivada dos trabalhos teóricos e experimentais de Rabl (1976a, 1981), adequa os para faixa de concentração nominal de $1 < C < 2$.

$$U = 1,0 + \frac{2,5}{C} \text{ (W / } ^\circ\text{C.m}^2\text{)} \quad (30)$$

Para uma dada temperatura de operação do coletor, T_e (temperatura do fluido na entrada do coletor). I_t representa a irradiação solar aceita pelo CPC (coletada), $U\Delta T$ a perda térmica e o termo q_t , indica a energia térmica líquida gerada no coletor. A rotina computacional calculou todos os elementos geométricos e ópticos dos concentradores CPC com absorvedor V invertido, completamente iluminado. A energia térmica instantânea gerada é dada por um balanço energético (Figura 19).

Figura 19 - Representação do balanço de energia em um CPC truncado



Fonte: O Autor (2024)

A formulação matemática da energia térmica gerada diariamente (q_T) está mostrada na equação (31) é baseada no clássico modelo de Hottel-Whillan-Bliss, que foi extensivamente analisado e adaptado para Concentradores Parabólicos Compostos no trabalho seminal de Rabl (1976):

$$q_T = F_R \int_{t_i}^{t_f} [\rho^{<n>} \alpha \tau (I_G) - U(T_e - T_{amb})] dt \quad (\text{GJ/m}^2) \quad (31)$$

Sendo:

- T_{amb} - Temperatura ambiente
- F_R - Fator de remoção de calor do CPC
- ρ - Refletividade da superfície refletora
- $<n>$ - Número médio de reflexões
- α - Absortância do absorvedor
- I_G - Radiação global na entrada superfície horizontal
- τ - Transmitância da cobertura de vidro.

Os intervalos t_i e t_f são os instantes do início e fim da coleção de energia térmica. Como foi utilizada a radiação mensal acumulada, consequentemente a anual, este valor será um somatório indicado pelas equações (32) e (33):

O valor da energia térmica mensal Q_T^m gerada pelo CPC para um dado mês (m) é:

$$Q_T^m = \sum_i q_T^i \quad (32)$$

O valor da energia térmica anual Q_T^a gerada pelo CPC é dado por:

$$Q_T^a = \sum_m Q_T^m \quad (33)$$

4.1.3 Método proposto de obtenção do CPC Padrão

A análise da Irradiação Solar Média utiliza bases climáticas de irradiação solar global horizontal (média anual) de duas diferentes regiões, no caso do Nordeste e Sul. Eles foram os parâmetros iniciais para desenvolvermos um concentrador solar parabólico composto (CPC) padronizado, capaz de fornecer energia térmica estável para aquecimento de processos, com flexibilidade de uso nessas regiões, minimizando a necessidade de adaptações locais. Foram testados o desempenho térmico de 7 configurações de concentradores de distintos ângulos de aceitação θ_a (65° ; $56,40^\circ$; 50° ; $45,60^\circ$; $38,70^\circ$; $33,75^\circ$, 30°), definindo o CPC que apresentará o

melhor desempenho térmico, dentre todos submetidos às mesmas condições de radiação própria das cidades de Caruaru-PE e Porto Alegre - RS, por simulação computacional.

Posteriormente, o CPC será truncado, redução de sua área refletora, alterando seu ângulo de aceitação. Dentre todos os ângulos (30° - 65°) em incremento de 1° . Para avaliar a uniformidade de desempenho dos diferentes CPCs entre regiões com distintas incidências solares, foi calculada a razão entre a energia horária gerada em Caruaru-PE (maior irradiação) e a energia horária gerada em Porto Alegre-RS (menor irradiação), somando-se os valores de janeiro a dezembro. Esse índice expressa o quanto próximo o CPC selecionado mantém sua geração em localidades distintas. Os resultados dessa razão foram apresentados na Tabela 4, sendo que para o CPC Padrão obteve-se um índice mínimo, indicando menor discrepância relativa entre as duas regiões. Sendo essa configuração, escolhida como o concentrador que pode fornecer energia, para calor de processo, em regiões com grandes disparidades geográficas de latitudes, sem significativas diferenças térmicas em desempenho. Considerar inclinação fixa equivalente à latitude da localidade (técnica simplificada) para reduzir ajustes. A metodologia de padronização facilita produção em série e redução de custos, provoca menor dependência de rastreadores solares, flexibiliza instalação em diferentes regiões, facilita a integração com trocadores de calor e termo acumuladores e contribui para sustentabilidade do processo de biodiesel.

4.1.4 Análise do coletor e filtragem nos dados das plataformas

A análise do coletor CPC padrão foi realizada utilizando dados de Radiação Solar Global Diária Média provenientes de plataformas confiáveis (Atlas Solarimétrico do Brasil, INMET, SWERA e dados NASA SSE), correspondentes às localidades de Caruaru-PE e Porto Alegre - RS, que possuem perfis distintos de irradiação.

Para garantir a consistência dos dados utilizados nas simulações computacionais, foi realizada uma filtragem prévia, eliminando dados inconsistentes ou fora dos padrões climáticos históricos (*outliers*), como valores atípicos por erro de medição em dias de manutenção ou panes em estações.

Após a filtragem:

- a) Calculou-se a média mensal e anual de radiação para cada localidade. Foram considerados valores de referência conservadores, evitando superestimação na modelagem de desempenho do CPC;
- b) Os dados consistentes foram então utilizados para calcular a energia incidente sobre o plano do coletor, corrigindo pela inclinação otimizada equivalente à latitude local para cada cidade.

Este processo garantiu segurança, reproduzibilidade e confiabilidade na análise de desempenho do CPC Padrão simulado e dimensionado para uso em regiões distintas, sem depender de valores isolados que pudessem distorcer o dimensionamento do sistema.

4.1.5 Detalhamento do Modelo Numérico e Premissas de Cálculo

Para atender aos objetivos deste estudo, a determinação de um CPC Padrão e a análise de seu desempenho energético, foi desenvolvido um algoritmo de cálculo em ambiente MATLAB®. Esta seção detalha o método de resolução, o regime de análise e as principais simplificações adotadas no modelo numérico.

a) Método de Resolução

O processo de cálculo implementado na rotina computacional segue os seguintes passos:

1. Cálculo Geométrico e Ótico: Inicialmente, o algoritmo calcula as propriedades geométricas e traçado do perfil refletivo (altura, perímetro, área de abertura) e óticas (número médio de reflexões $\langle n \rangle$, eficiência ótica η) para cada uma das 7 configurações de CPC analisadas (com ângulos de aceitação de 65° a 30°), utilizando as equações descritas em Brandão (2004) e Fraidenraich (2003);
2. Geração das Séries de Irradiação: A partir dos dados de irradiação solar global diária média mensal, extraídos do Atlas Solarimétrico do Brasil, o modelo gera séries temporais sintéticas de irradiação solar horária para um ano típico. Este procedimento foi realizado conforme a metodologia de Aguiar et al. (1988) e as correlações de Collares-Pereira et al. (1987);

3. Cálculo da Energia Horária: Para cada hora do ano (8760 intervalos), o algoritmo calcula a energia térmica líquida gerada pelo coletor;
4. Integração Anual: A energia térmica anual gerada por cada configuração de CPC é obtida pelo somatório da energia líquida calculada em cada um dos intervalos horários, conforme as equações (32) e (33).

Para gerenciar e organizar eficientemente os múltiplos conjuntos de dados (parâmetros geométricos, vetores de energia mensal, entre outros.), para cada uma das 7 configurações de CPC, foram utilizados matrizes celulares (*cell arrays*) no MATLAB®. Essa estrutura de dados permitiu armazenar, de forma organizada em uma única variável, os resultados heterogêneos de cada simulação, facilitando a análise comparativa posterior. A plataforma foi utilizada como ferramenta de modelagem computacional para simulação e subsídio para análise do desempenho térmico dos coletores CPC em diferentes condições de irradiação, ângulos de aceitação e latitudes, permitindo validar e otimizar o CPC Padrão proposto.

b) Funções específicas do MATLAB® usadas na tese:

1. Modelagem Matemática:

Implementação de equações de eficiência ótica, cálculo de energia incidente e energia térmica útil coletada pelos CPCs, de forma parametrizada;

2. Uso de Matrizes Celulares:

Foram empregados matrizes celulares para armazenar, organizar e processar os dados de irradiação solar, inclinação, ângulo de aceitação e rendimento diário de cada coletor, permitindo simulações paralelas de diferentes configurações de CPC e locais (Caruaru e Porto Alegre);

3. Geração de Gráficos para Análises:

Os resultados simulados foram convertidos automaticamente em gráficos de geração diária e anual de energia térmica (Wh/m²), facilitando a visualização e análise comparativa entre os ângulos de aceitação (30°- 65°);

4. Auxílio ao Dimensionamento do CPC:

O interpretador foi essencial para determinar qual ângulo de aceitação gerava maior eficiência anual com menor diferença entre regiões, definindo o CPC Padrão sem necessidade de rastreadores solares.

c) Regime de Análise

A análise de desempenho energético foi conduzida em um regime *quasi-estacionário* (ou *quasi-estático*). Nessa abordagem, assume-se que para cada intervalo de tempo de uma hora, as condições de contorno (irradiação solar, temperatura ambiente) são constantes (regime permanente). O balanço de energia (equação 21) é resolvido para este intervalo, determinando a energia útil gerada. A performance ao longo do dia, mês ou ano é então obtida pela integração ou somatório desses resultados horários, capturando assim o comportamento transitório do sistema ao longo do tempo.

d) Método de Resolução Computacional

Foram implementadas equações de cálculo de energia térmica coletada pelos CPCs, em função da área de coleta, radiação solar incidente e eficiência óptica média, sendo estas parametrizadas para diferentes ângulos de aceitação e latitudes. O modelo considerou:

- Propriedades térmicas constantes do fluido de trabalho na faixa de operação;
- Regime permanente, utilizando médias horárias e diárias de radiação para análise de desempenho anual;
- Simplificação de perdas térmicas laterais desprezíveis;
- Desprezo de efeitos de poeira e vento nas simulações preliminares.

Os cálculos permitiram determinar:

- Energia térmica coletada (Wh/m^2).
- Razões de geração entre diferentes localidades.
- Eficiência do sistema CPC em diferentes ângulos de aceitação.

e) Simplificações e Premissas adotadas

Para a viabilização do modelo numérico, as seguintes premissas e simplificações foram adotadas:

1. Coeficiente de Perdas Térmicas (U): O coeficiente global de perdas térmicas do coletor foi estimado utilizando a curva empírica de Rabl (1976a, 1981), descrita na equação (30). Esta abordagem simplifica o cálculo ao relacionar o coeficiente de perdas térmicas (U_L) diretamente com a razão de concentração geométrica (C) do coletor. Isso evita a necessidade de um cálculo mais complexo que envolveria a determinação individual das perdas por convecção e radiação, sendo uma aproximação adequada para a faixa de concentração analisada neste trabalho;
2. Fator de Remoção de Calor (F_R): O valor do fator de remoção de calor foi considerado constante e igual a 0,90. Este é um valor característico para coletores solares térmicos de alta qualidade e bom projeto, conforme estabelecido na literatura de referência da área;
3. Propriedades Óticas dos Materiais: As propriedades de refletividade da superfície refletora ($\rho_C = 0,86$), absorância do absorvedor ($\alpha = 0,95$) e transmitância da cobertura de vidro ($\tau = 0,90$) foram consideradas constantes e independentes do ângulo de incidência ou da temperatura.

O modelo computacional em MATLAB® foi um subsistema de apoio ao dimensionamento, análise comparativa e otimização do CPC, permitindo fundamentar a escolha do CPC Padrão de 56,40° (truncamento a 45,60°), validando os resultados obtidos de forma prática, confiável e replicável em qualquer região.

A configuração da cavidade refletora truncada com os parâmetros geométricos, óticos e geográficos locais do CPC, associadas as equações (25 - 29) de sua cavidade, seguiu os procedimentos abaixo:

- a) Dados de entrada: ângulo de aceitação (igual para ambos os locais), comprimento do semi-perímetro do absorvedor (igual para ambos os locais), semi-ângulo do vértice do absorvedor (para CPC truncado $\rightarrow \gamma = \theta_a$) latitude local;

- b) Parâmetros de saída: Eficiência ótica do coletor, eficiência térmica, número médio de reflexões.

A segunda rotina, associadas as equações (21 - 23), terão:

- c) Parâmetros de entrada: Radiação Global das duas localidades, Ângulo de aceitação, número médio de reflexões, temperatura média local;
- d) Parâmetros de saída: Energia gerada pelo CPC truncado para ambas localidades e seu gráfico de comportamento.

A adoção destas premissas é uma prática comum em simulações energéticas anuais, permitindo uma análise robusta do desempenho comparativo entre diferentes configurações de coletores com um custo computacional viável (Fraidenraich, 2017). A partir dos resultados, foi possível selecionar o CPC Padrão com melhor desempenho anual e menor variação entre regiões, visando sua replicação em sistemas de aquecimento solar para calor de processo.

4.2 DESCRIÇÃO DA USINA DE BIODIESEL EM CAETÉS (PERNAMBUCO)

A usina foi instalada pelo Centro de Tecnologias Estratégicas do Nordeste - CETENE que utiliza na área de processamento químico de matéria-prima, quatro depósitos de 20 mil litros, sendo dois para a matéria-prima e dois para o biodiesel, um laboratório e uma área administrativa. A usina foi estruturada para produção diária de 2500 litros (dois mil e quinhentos litros) de biocombustível e se dedica à pesquisa de oleaginosas e da qualidade do biocombustível gerado. É uma unidade piloto de processamento de biodiesel que viabiliza soluções tecnológicas inovadoras para o desenvolvimento da cadeia de produção de biodiesel e o processo industrial começa com o esmagamento das sementes de algodão para obtenção de óleo bruto. O local geométrico da Planta de Biodiesel tem latitude de (-8,77°) e (-36,62°) de longitude, porém, atualmente a planta está em inatividade e um dos motivos é a falta de matéria prima (Figura 20).

Figura 20 - Localização geográfica da cidade de Garanhuns.



Fonte: Google Earth

4.2.1 Utilização da energia heliotérmica e análise energética

A solução Heliotérmica para a operação de uma planta de produção de biodiesel é obtida pela geração de energia térmica e elétrica proveniente dos raios solares de maneira indireta, pois a irradiação do sol é captada, armazenada e, posteriormente, transformada em calor de processo, com a instalação de painéis solares (CPCs Padrão). O calor acumulado é usado para aquecer um fluido térmico e direcioná-lo para área de reação (Reatores), funcionando os setores que operam com calor de processo. A eletricidade convencional, que é originária da concessionária de energia, atenderá as demais áreas da usina.

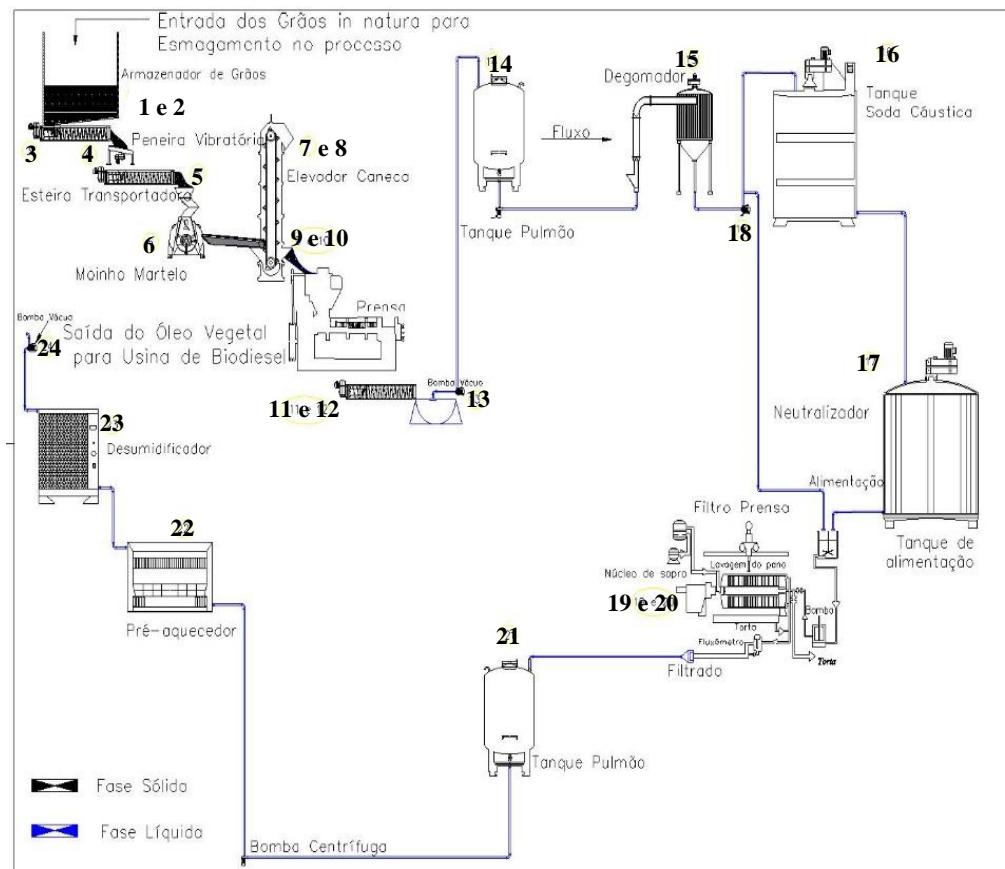
A etapa industrial do processo de análise energética se dá pela quantificação de forma estimada da energia diretamente consumida e ou indiretamente utilizada, sendo o somatório do conteúdo de energia bruta de cada equipamento envolvido no processo (Castanheira et al., 2014). Segundo Comitre (1993), a importância da análise e do balanço energético para indicar parâmetros com a finalidade de mensurar, interpretar e subsidiar tomadas de decisões no direcionamento das políticas tecnológicas. A utilização do novo combustível depende, entre outros fatores, de uma relação positiva entre a energia consumida no processo de produção e a energia disponibilizada pelo combustível produzido. É fundamental ter um balanço energético positivo para a utilização racional de derivados de biomassa como combustíveis (Canabarro et al., 2022). Para Bueno et al., (2010), o balanço de energia

é um instrumento de contabilização da energia produzida e das energias consumidas em um determinado sistema de produção, com a função principal de traduzir em unidades, ou equivalentes energéticos, os fatores de produção e os consumos intermediários, possibilitando a construção de indicadores comparáveis entre si, que permitam a intervenção no sistema produtivo visando melhorar sua eficiência. Mello (1986) considerou que os índices devem ser construídos na intenção de mensurar e comparar relações e grandezas que entram e saem dos agroecossistemas. Risoud (1999) complementa que a unidade utilizada em estudos de eficiência energética deve ser o Joule (J) e seus múltiplos, particularmente em Megajoules (MJ).

4.2.2 Estimativa da energia consumida no esmagamento

Para realizar a avaliação da energia consumida, foi necessário um diagrama de transformação da semente de algodão em óleo vegetal. A Figura 21 mostra o processo, fluxo e maquinário para obtenção da energia consumida, aferição da potência sob condições de trabalho.

Figura 21 - Diagrama esquemático do processo para obtenção do óleo



Fonte: O Autor (2016)

O maquinário do processo de esmagamento está listado abaixo.

1	Armazenador de Grãos	13	Bombas 1
2	Declive do armazenador	14	Tanque pulmão 1
3	Rosca da esteia	15	Degomador
4	Esteira transportadora	16	Filtro prensa
5	Transportador helicoidal de grãos	17	Neutralizador
6	Moinho martelo	18	Bomba 2
7	Elevador de caneca	19	Filtro prensa 1
8	Elevador de caneca	20	Filtro prensa 2
9	Entrada da prensa	21	Tanque pulmão 2
10	Saída na prensa	22	Pré- aquecedor e desumidificado
11	Prensa de 100kg/h	23	Desumidificador
12	Prensa de 400kg/h	24	Bombas 2

A importância desse levantamento é mostrar onde pode ser evidenciado o consumo e observar o quanto irá refletir no balanço energético geral da usina, após o término da produção de biodiesel, bem como uma tomada de decisão para, futuramente, substituir o fornecimento de energia convencional por uma renovável.

4.3 PROCESSO DE PRODUÇÃO DE BIODIESEL

O processo de produção de biodiesel considerado neste estudo tem como matéria-prima principal o óleo de semente de algodão previamente extraído e pré-tratado. A rota adotada é a da transesterificação alcalina, amplamente utilizada em plantas de pequeno e médio porte devido à sua simplicidade operacional e elevado rendimento.

A produção envolve, de forma resumida, as seguintes etapas:

- **Recebimento e pré-tratamento do óleo vegetal:** retirada de impurezas, secagem e ajuste de acidez para atender às especificações do processo;
- **Mistura com álcool e catalisador:** o óleo é misturado a um álcool (etanol ou metanol) e a um catalisador básico (geralmente hidróxido de sódio ou potássio) para iniciar a reação de transesterificação;
- **Reação de transesterificação:** realizada em reatores aquecidos, onde ocorre a conversão dos triglicerídeos do óleo em ésteres *alquílicos* (biodiesel) e glicerina como subproduto;
- **Separação de fases:** após a reação, a mistura é decantada ou centrifugada para separar o biodiesel bruto da glicerina;

- **Lavagem e purificação do biodiesel:** remoção de resíduos de catalisador, álcool e glicerina, obtendo um produto dentro das normas de qualidade;
- **Estocagem:** o biodiesel final é armazenado em tanques apropriados até sua utilização ou comercialização.

Neste trabalho, o aquecimento necessário ao processo (especialmente nas etapas de reação e pré-tratamento) é fornecido pelo sistema heliotérmico dimensionado nos capítulos anteriores, composto por coletores CPC padrão, trocador de calor casco e tubo e reservatório térmico. Essa integração visa reduzir o consumo de combustíveis fósseis, aumentando a sustentabilidade e a eficiência energética da planta de biodiesel. O processo foi realizado no galpão principal da Usina Piloto, o óleo bruto produzido sofrerá modificação estrutural de suas moléculas, tornando-se praticamente idêntica ao óleo diesel e, por consequência, com propriedades físico-químicas similares.

4.4 MEMÓRIA DE CÁLCULO DO TROCADOR DE CALOR E EQUIPAMENTOS AUXILIARES

Os trocadores de calor são componentes essenciais para sistemas solares que utilizam a energia térmica para aquecer os fluidos de transporte. São responsáveis pela integração dos sistemas e por transferir calor, garantindo o aquecimento desejado. O dimensionamento do trocador de calor de casco e tubos, detalhado nesta seção, foi realizado de forma puramente analítica, baseando-se nas equações fundamentais da transferência de calor e da mecânica dos fluidos. A metodologia segue a abordagem clássica apresentada em literaturas de referência da área, como Incropera et al., (2007) e Duffie & Beckman (2013). Para este fim, não foi utilizada nenhuma plataforma de software comercial de simulação (e.g., HTFI, Aspen) e de construção. Optou-se por esta abordagem "primeiros princípios" a fim de obter total controle e compreensão sobre todas as variáveis do projeto e para demonstrar, de forma explícita, a aplicação da teoria na prática de engenharia, ao invés de depender de uma simulação computacional em "caixa-preta".

4.4.1 Dimensionamento do trocador de calor de casco e tubo

Para o dimensionamento serão determinadas a capacidade térmica exigida, a taxa de transferência de calor no trocador, a vazão dos fluidos envolvidos, o número de coletores solares necessários e o volume do reservatório térmico, visando autonomia operacional, exigindo aplicação de algumas equações e considerações.

Nota: As temperaturas apresentadas neste capítulo estão expressas em °C, exceto quando explicitado o uso da escala *Kelvin* em cálculos que exigem temperatura absoluta. Todos os coeficientes térmicos (U , h , k) foram expressos nas unidades do Sistema Internacional (W/ (m²·K) ou W/(m·K)), sendo as diferenças de temperatura tratadas em °C por conveniência, uma vez que 1 °C de variação é igual a 1K.

As equações 34a, 34b, 34c e 34d são utilizadas para descrever os fenômenos que ocorrem no trocador de calor nos dois fluidos:

$$q_{Tr} = UA_{Troca}(LMTD) \quad (34 \text{ a})$$

Onde:

q_{Tr} – Quantidade de calor ou carga térmica (W).

A_{Troca} – Área de troca da superfície (m²).

U – Coeficiente global de transferência de calor (W/(m²·K)).

$LMTD$ – Diferença de temperatura média logarítmica (°C).

Os valores termo físicos dos fluidos, com posse do peso específico de ambos em kg/m³:

A equação do fluido aquecedor (lado do casco): Água quente proveniente do CPC.

$$q_{Tr\,Água} = m_Q \, Cp_Q (T_{QE} - T_{QS}) \quad (34 \text{ b})$$

Onde:

m_Q – Vazão mássica da água (kg/s).

Cp_Q – Calor específico da água (J/kg· °C).

T_{QE} – Temperatura de entrada do fluido quente (C°).

T_{QS} – Temperatura de saída do fluido quente (C°).

A equação do fluido frio (lado dos tubos): Óleo térmico (Dowtherm) para a Usina.

$$q_{Tr\text{Óleo}} = m_F \cdot Cp_F \cdot (T_{FS} - T_{FE}) \quad (34\text{ c})$$

Onde:

m_F – Vazão mássica do óleo térmico	(kg/s).
Cp_F – Calor específico do óleo térmico	(J/kg·°C).
T_{FS} – Temperatura de saída do fluido frio	(C°).
T_{FE} – Temperatura de entrada do fluido frio	(C°).

Os parâmetros da equação 34(a) serão descritos e dependem de alguns coeficientes definidos a seguir:

$$A_{Troca} = \frac{Q_{C_{arg\,a\,Termica}}}{U \cdot LMTD \cdot F} \quad (34\text{d})$$

Para este dimensionamento, considerou-se uma configuração de trocador de calor com escoamento puramente contracorrente, que representa a condição de máxima eficiência termodinâmica para a troca de calor. Nesta configuração ideal, o Fator de Correção da Média Logarítmica das Diferenças de Temperatura (F) é igual a 1,0. Portanto, o $LMTD$ calculada pela equação (47) pode ser utilizada diretamente na equação de projeto (equação 34a) sem a necessidade de um fator de correção adicional. Esta abordagem é adequada para uma análise de viabilidade e dimensionamento preliminar do sistema.

O coeficiente global de troca térmica U (W/m²·°K) é fator da combinação das resistências térmicas entre os dois fluidos e o material da parede do tubo. A metodologia de cálculo do coeficiente global de transferência de calor U foi revisada para incorporar a formulação correta para a resistência de condução em paredes cilíndricas (Incropera et al., 2007).

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_0} + \frac{D_0 \ln(D_0 / D_i)}{2k_{tubo}} + \left(\frac{D_0}{D_i} \right) \frac{1}{h_1} \quad (35)$$

$$R_{cond} = \frac{D_0 \ln(D_0/D_i)}{2k_{tubo}}$$

Onde o termo do meio (R_{cond}) representa a resistência de condução para um cilindro oco. Adicionalmente, verificou-se que o escoamento do óleo térmico ocorre em regime laminar ($Re < 2.300$), sendo a correlação de Nusselt para este regime, e não a de Dittus-Boelter, a apropriada para o cálculo do coeficiente de convecção interno (h_i).

Sendo:

D_0 – Diâmetro externo do tubo (mm)

D_i – Diâmetro interno do tubo (mm)

h_i - Coeficiente de convecção do lado interno (W/m².K)

h_o - Coeficiente de convecção do lado externo (W/m².K)

K – Condutividade térmica do material (W/m.K)

Para estimar e calcular h_i e h_o , com correlações de transferência de calor por convecção, teríamos que usar a igualdade de *Nusselt* para escoamento interno e externo (Duffie, J.A. & Beckman, 2013):

1) Fluido dentro do tubo (Downtherm):

a) Área da seção transversal por tubo:

$$A_{Interna} = \frac{\pi D_i^2}{4} (m^2) \quad (36)$$

Onde:

D_i - Diâmetro interno do tubo:

b) Vazão volumétrica:

$$Vz_{Óleo} = \frac{m_{Óleo}}{\rho_{Óleo}} (m^3 / s) \quad (37)$$

Sendo:

$m_{Óleo}$ - Vazão mássica do óleo (kg/s).

$\rho_{Óleo}$ - Peso específico do óleo (kg/m³).

c) Velocidade média no tubo:

$$v_{Óleo} = \frac{Vz_{Óleo}}{A_{Interna} \cdot N_{tubos}} \text{ (m/s)} \quad (38)$$

Onde:

N_{tubos} - Número de tubos

A área lateral dos tubos é igual (m²):

$$A_{Tubos} = \pi D_{Externo} L N_{tubos} \quad (39)$$

Onde:

L – Comprimento dos tubos (m)

d) Número de Reynolds:

$$Re_{Óleo} = \frac{\rho_{Óleo} v_{Óleo} D_{interno}}{\mu_{Óleo}} \quad (40)$$

Onde:

$\mu_{Óleo}$ - Viscosidade dinâmica do óleo (Pascal.segundos (Pa.s))

Caso escoamento turbulento ($Re > 2300$).

e) Número de Prandtl:

$$Pr_{Óleo} = \frac{cp_{Óleo} \mu_{Óleo}}{k_{Óleo}} \quad (41)$$

Onde:

$k_{Óleo}$ - Condutividade térmica do óleo (W/m·K)

f) Número de Nusselt (correlação de Nusselt)

Para correlação (fluxo laminar): Para escoamento laminar plenamente desenvolvido em um tubo, o Número de Nusselt é um valor constante padrão para a condição de fluxo de calor constante.

$$Nu_{Óleo} = 4,36 \quad (42)$$

Finalizando com o coeficiente de convecção interno h_i :

$$h_i = \frac{Nu_{Óleo} k_{Óleo}}{D_{Interno}} \quad (43)$$

2) Lado externo (água no casco aquecida pelo CPC)

Será utilizada uma correlação empírica para casco com tubos organizados em feixe transversal:

a) Suposição simplificada (correlação Zukauskas):

Para escoamento externo em feixe de tubos transversal, Reynolds baseado no diâmetro externo:

$$Re_{Água} = \frac{\rho_{Água} v_{Água} D_{Externo}}{\mu_{Água}}$$

Onde:

$v_{Água}$ - Velocidade de deslocamento da água 1,2 m/s (Telles, 2006)

Caso escoamento fortemente turbulento:

$$Pr_{Água} = \frac{cp_{Água} \cdot \mu_{Água}}{k_{Água}}$$

b) Nusselt (Zukauskas para $Re > 2300$):

A Correlação geral para feixe de tubos transversais é:

$$Nu_{Água} = C \cdot Re^m \cdot Pr^{0,36} \cdot \left(\frac{Pr}{Pr_s} \right)^{0,25} \quad (44)$$

- C e m variam conforme o intervalo de Reynolds e a configuração (inline / staggered).
- Pr_s é o número de Prandtl na superfície do tubo.

Obs.: A omissão do termo $(Pr/Pr_s)^{0,25}$ é uma simplificação comum em muitos cálculos de engenharia, aplicada aqui, especialmente para dimensionamento preliminar. Isso ocorre porque, quando as variações de temperatura entre a superfície do tubo e o fluido não são extremas, o valor de Pr_s é muito próximo ao de Pr , e o termo de correção se aproxima de 1,0, tendo pouco impacto no resultado final (Incropera et al., 2007).

No caso, os coeficientes são para um arranjo normal:

$$C \approx 0,27$$

$$m \approx 0,63$$

$$Nu_{Água} = 0,27 \cdot Re_{Água}^{0,63} \cdot Pr_{Água}^{0,36} \cdot \left(\frac{Pr_{Água}}{Pr_s} \right)^{0,25} \quad (45)$$

c) Finalizando com o coeficiente de convecção externo h_o :

$$h_o = \frac{Nu_{Água} \cdot k_{Água}}{D_{Externo}} \quad (46)$$

Os mecanismos estão baseados em diferenças de temperatura. Nos trocadores de calor, é importante perceber que esta diferença de temperatura pode mudar ao longo do equipamento. Portanto, é evidente que para avaliar a transferência de calor no trocador, é necessário descrever as diferenças de temperaturas entre os fluidos quente e frio no interior do trocador de alguma maneira. Para isso, recorremos ao conceito de média logarítmica (*LMTD*). Considera-se um trocador de calor puramente contracorrente, Figura 22.

Figura 22 – Trocador de calor com escoamento puramente contracorrente.



Fonte: Rodrigo Orgeda e Henryck Cesar Massao Hungaro Yoshi (modificado)

Denominando-se θ_1 a diferença de temperatura entre estas duas correntes, a diferença de temperaturas dos CPCs ($T_{\text{Quente de Entrada}}$ e $T_{\text{Frio de Saída}}$): $\theta_1 = T_{QE} - T_{FS}$

A diferença de temperaturas ($T_{\text{Quente de Saída}}$ e $T_{\text{Frio de Entrada}}$) entre estas duas correntes, para a usina, será dita θ_2 e é dada por: $\theta_2 = T_{QS} - T_{FE}$

A integração entre as equações de projeto se faz de forma que a transferência de calor esteja relacionada com a média logarítmica das diferenças de temperaturas ($LMTD$), a qual é calculada utilizando as diferenças de temperatura nos extremos do trocador:

$$LMTD = \left(\frac{\theta_1 - \theta_2}{\ln \frac{\theta_1}{\theta_2}} \right) \quad (47)$$

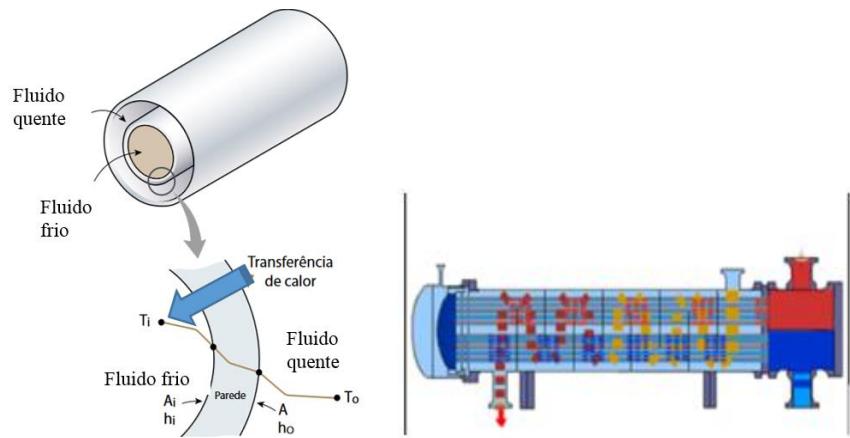
A formação de incrustações pode reduzir significativamente a eficiência do trocador. Opcionalmente, considera-se um fator de incrustação nos cálculos. As Camadas de incrustação são termos adicionais de resistência térmica. Geralmente, utilizamos a letra (f) para indicar estas resistências (devido ao termo em inglês para incrustação, “fouling”). Dessa forma, sendo $R_{f,i}$ e $R_{f,o}$ os chamados fatores de incrustação das superfícies interna e externa ($\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$), respectivamente, será ajustado a expressão para o cálculo da resistência total e coeficiente de transferência de calor, sujo, por U_{sujo} :

$$U_{\text{sujo}} = \frac{1}{(U_C + R_{f,i} + R_{f,o})} \quad (\text{W/}(\text{m}^2 \cdot \text{K})) \quad (48)$$

Esses fatores de incrustação por unidade são tabelados e encontrados em manuais mais específicos dos fornecedores.

O circuito térmico associado a um trocador, em que um fluido percorre o interior do tubo e o outro percorre a região ao redor do tubo, Figura 23.

Figura 23 - Circuito térmico associado a um trocador de calor.



Fonte: Modificado de Çengel e Cimbala (2015, p. 633).

4.4.2 Bombeamento do fluido térmico

As bombas de circulação são responsáveis por movimentar o fluido térmico nos sistemas solares heliotérmicos. Elas garantem que o calor captado pelos coletores solares seja transferido para o reservatório térmico, onde será armazenado para uso posterior. As bombas de circulação podem ser acionadas pelos controladores de temperatura ou por temporizadores, dependendo das necessidades. Serão atribuídos os cálculos de dimensionamento do sistema de bombeamento e sua tubulação ligada ao recalque, ou de uma tubulação cujo escoamento seja por diferença de altura. Podem operar em temperaturas que variam de 100 °C até 400 °C ou mais, de acordo com as normas para bombeamento ABNT NBR 13714 - ABNT NBR 15358 e tubulações ANSI.B-31.

Potência da bomba:

$$P = \frac{\rho \cdot g \cdot V_z \cdot H}{\eta} \quad (W) \quad (49)$$

Sendo:

H – Altura manométrica;

ρ – Peso específico do óleo térmico (kg/m³)

g – Gravidade local (m/s²)

d – Diâmetro (m)

$$Vz - \text{Vazão (m}^3/\text{s}) = \pi \cdot \frac{d^2}{4} (\text{m}^2) \cdot \text{velocidade (m/s)}$$

η – Rendimento.

O Fluído que será utilizado para transferência de calor é óleo sintético à base de poliolefinas (são hidrocarbonetos insaturados que incluem o etileno (C₂H₄) e o propileno (C₃H₆)). O GTerm 350s é especialmente recomendado para sistemas abertos com temperaturas de operação da ordem de -40°C a 330°C. São termicamente estáveis em temperaturas variáveis e com potencial extremamente baixo para decomposição. Para isolamento térmico dos coletores e tubulações, recomenda-se envolver com lã de rocha que é resistente a altas temperaturas e à umidade.

4.4.3 Cálculos para capacidade do reservatório térmico.

Os reservatórios térmicos são utilizados para armazenar o calor captado pelos coletores solares nos sistemas solares de energia solar térmica. São responsáveis por garantir que a energia captada durante o dia seja armazenada e utilizada posteriormente, quando necessário.

O cálculo para o volume, será:

$$Q = Pu \cdot t$$

$$m = \frac{Q}{Cp \cdot \Delta T} \quad (50)$$

$$V = \frac{m}{\rho}$$

Onde:

P_u – Potência da usina	(W)
t – tempo	(s)
ρ – Peso específico do óleo	(kg/m ³)
C_p – Capacidade calorífica do fluido	(J/kg.°C)
Q – Energia ou a carga térmica	(q_{Tr}) (W)
m – Massa do reservatório	(kg)
ΔT – Variação de temperatura	(°C)
V – Volume do reservatório	(m ³)

4.5 MATERIAIS E MÉTODOS DE AFERIÇÃO DA ENERGIA ELÉTRICA

O processo de aquecimento na produção de biodiesel usava resistências elétricas. O calor do processo, neste trabalho, foi obtido pelo cálculo do efeito *Joule* com os valores elétricos medidos diretamente na usina. A obtenção direta de dados de consumo de energia elétrica da usina de produção tem sua aferição descrita no item a seguir.

4.5.1 Medição da energia elétrica na produção de biodiesel

A aferição de energia elétrica, consumida em todo processo, foi realizada com o Analisador de Qualidade de Energia Minipa, Modelo ET 5060C, com diferença de 15 dias entre a calibração e a aferição, com precisão de 1/100 W, de acordo com normas internacionais para realizar testes de qualidade de energia IEC 1159, Figura 24.

Figura 24 - Medidor de energia de fabricante Minipa, Modelo ET 5060C.



Fonte: O Autor (2015)

Foi utilizado, também, um alicate amperímetro da Minipa, Modelo ET 3910, Figura 25 e um computador foi acoplado ao ET 5060C para coletar os dados.

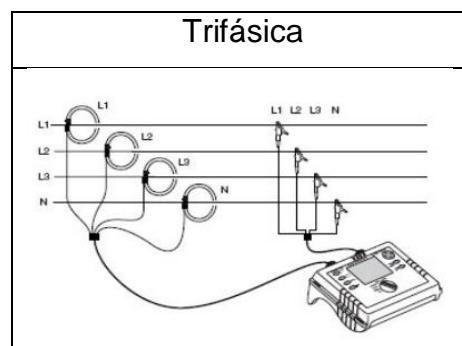
Figura 25- Alicate amperímetro usado no projeto



Fonte: O Autor (2015)

Os valores das grandezas de tensão corrente e frequência elétricas foram medidas com o instrumento instalado no quadro de distribuição de força, conforme o desenho esquemático das Figura 26.

Figura 26 - Desenho esquemático de instalação do medidor de energia



Fonte: Smartfaq (2021)

Através das medidas de tensão, corrente elétrica e potências realizadas pelo analisador de energia, foi aferida a energia individual e total dos equipamentos do processo de esmagamento, obedecendo ao princípio do cálculo de potência:

$$P = i \cdot \sqrt{3} \cdot U \cdot \cos(\varphi) \text{ (W)} \quad (51)$$

Onde:

P – Potência do motor em Watts;

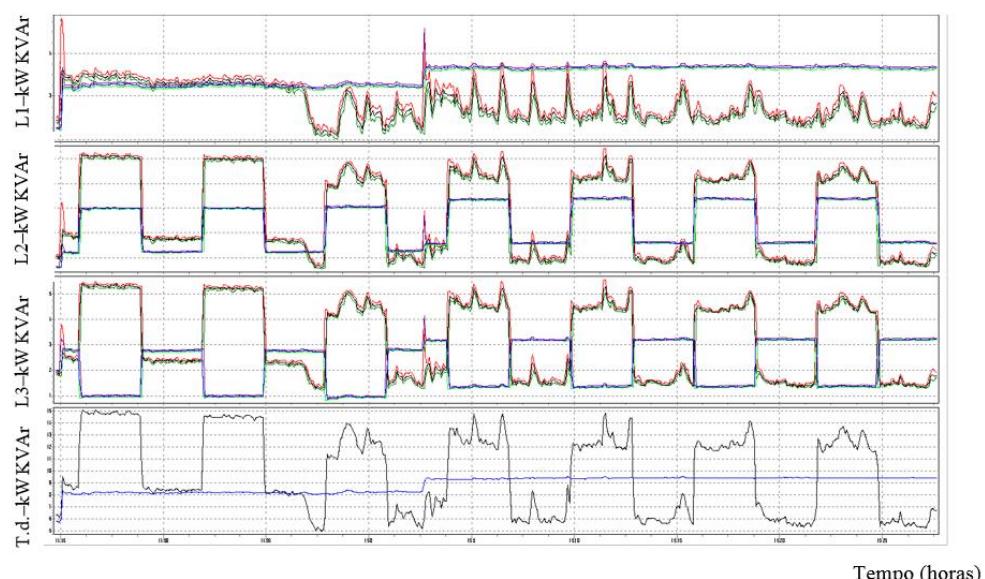
U – Tensão da linha em volts;

$\cos(\varphi)$ – Fator de potência do motor (diferença entre consumo aparente e real).

A equação 52 revela a igualdade para cálculo da energia (kWh) consumida durante o processo, onde a potências nominais (P_N) dos equipamentos foi multiplicada pelo intervalo de tempo (Δt), em segundos, que os equipamentos executam as atividades. A Figura 27 revela como foram interpretados e mostrados, no monitor do computador, os gráficos da potência em kW (ordenada) vs. tempo de funcionamento em hora (abscissa), resultante da aferição do medidor de energia:

$$\text{Energia} = P \Delta t \quad (52)$$

Figura 27 - Potência ativa e reativa x tempo aferida pelo analisador de energia



Fonte: O Autor (2015)

Relativo à aferição na energia solar, a Potência Excedente Registrada - PER refere-se à capacidade de geração de energia térmica que o sistema heliotérmico oferece em momentos em que a irradiação solar incidente e/ou a eficiência do coletor superam a demanda térmica instantânea ou programada do processo de produção de biodiesel. Em outras palavras, o PER quantifica a energia térmica adicional que é produzida pelo sistema solar além do que é imediatamente consumido pela carga térmica do processo. Este excedente, quando não gerenciado adequadamente, pode ser perdido, mas representa um potencial significativo para otimização energética através de estratégias de armazenamento ou de uso em outras aplicações secundárias. O conceito de PER é fundamental para a avaliação da intermitência da fonte solar e para o dimensionamento otimizado, pois permite identificar:

1. Períodos de Superávit Energético: Momentos em que o sistema solar poderia estar contribuindo com mais energia do que o processo exige;
2. Potencial de Armazenamento: A magnitude do excedente serve como base para o dimensionamento de Sistemas de Armazenamento de Energia Térmica -SAET, como tanques de acumulação, que podem estocar essa energia para uso em períodos de baixa irradiação ou alta demanda noturna/nublada;
3. Oportunidades de Otimização: O PER também indica a possibilidade de expandir a utilização da energia solar para outras cargas térmicas secundárias na planta, caso o sistema seja superdimensionado para a carga principal ou em dias de altíssima insolação.

4.5.2 Confiabilidade e incerteza das medições

Embora uma análise estatística formal de propagação de incertezas não tenha sido o escopo principal deste estudo, foram adotados procedimentos metodológicos rigorosos com o objetivo de assegurar a confiabilidade dos dados e minimizar as incertezas inerentes ao processo de medição de energia elétrica. A confiabilidade dos dados coletados, que serviram de base para o balanço energético e o subsequente dimensionamento do sistema de integração, foi garantida pelos seguintes fatores:

- a) **Uso de Instrumentação de Relativa Precisão e Calibrada:** As medições de consumo energético foram realizadas com um analisador de qualidade de energia profissional (Minipa, Modelo ET 5060C), com precisão nominal de 1/100 W.

Crucialmente, o equipamento foi utilizado com uma defasagem de apenas 15 dias em relação à sua data de calibração, assegurando que os desvios de medição estivessem dentro dos limites especificados pelo fabricante;

b) **Adesão a Normas Técnicas Internacionais:** O protocolo de aferição seguiu as diretrizes da norma internacional *IEC 1159*, que estabelece os procedimentos padronizados para a realização de testes de qualidade de energia, garantindo assim a consistência e a rastreabilidade da metodologia empregada.

5 DIMENSIONAMENTO E PROJETO DO SISTEMA SOLAR-BIODIESEL

Este capítulo apresenta a aplicação da metodologia descrita no Capítulo 4 para o dimensionamento e projeto dos componentes que formam o sistema de integração heliotérmica. O objetivo é detalhar o processo de decisão e os cálculos que levaram à especificação do coletor solar, do trocador de calor e dos equipamentos auxiliares, como a bomba e o reservatório térmico para atender à demanda da usina de biodiesel em estudo.

5.1 Determinação do Coletor CPC Padrão

A Tabela 3 mostra os valores calculados da energia gerada pelos CPCs e o valor das energias geradas onde foram dimensionados e testados (2º coluna). Os parâmetros utilizados foram: Latitude/Longitude/Temperatura Média Anual de Caruaru -8.28°/-30.03°/22.50°; Latitude/Longitude/ Temperatura Média Anual de Porto Alegre -35.97°/-51.22°/16.50°. Suas orientações são: Leste-Oeste, azimute zero - face voltada ao Hemisfério Norte), como indica a Figura 11 do Capítulo 3.

Tabela 3 - Energia anual gerada e rendimentos do CPC em Wh/m²

Dimensionamento e localização da aplicação	Wh/m ² . ano	Eficiência Térmica: $\eta = \frac{\text{Energia Gerada}}{\text{Radiação Incidente}}$
Caruaru em Caruaru	42081,60	0,67
Caruaru em Porto Alegre	35171,87	0,66
Porto Alegre em Porto Alegre	<u>34463,29</u>	<u>0,65</u>
Porto Alegre em Caruaru	40900,32	0,65

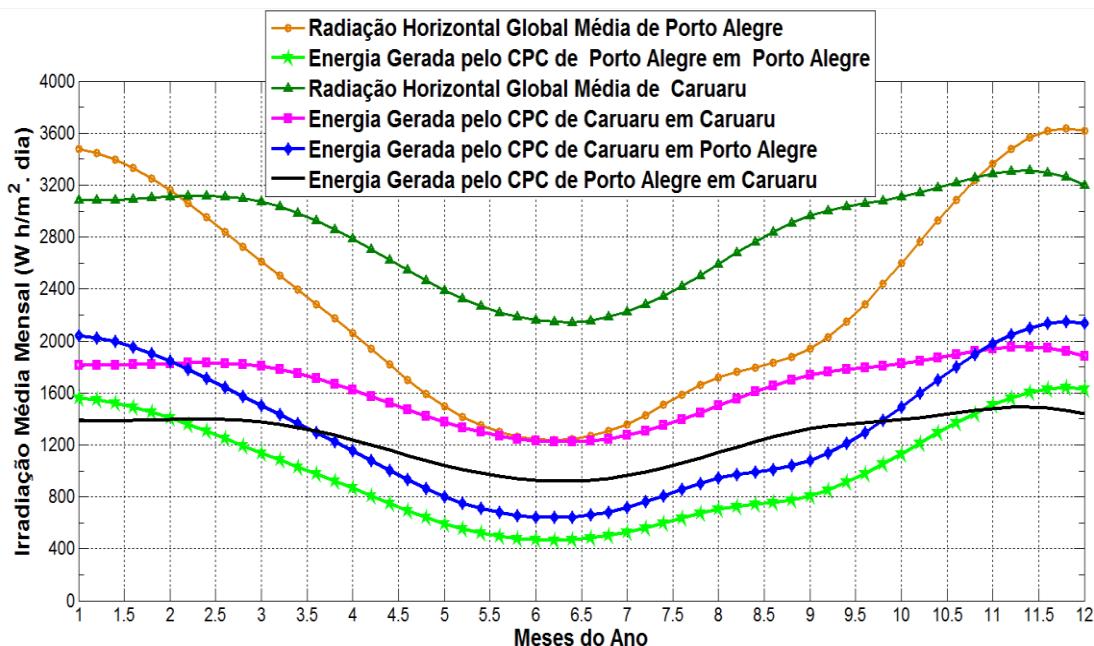
Fonte: O Autor (2024)

Outros parâmetros fixos, referentes às características de fabricação da superfície refletora, foram aplicados: $\alpha = 0,95$; $\rho_c = 0,86$; $F_R = 0,90$; $\tau=0,90$.

5.1.2 Análise comparativa entre Caruaru e Porto Alegre

As curvas do gráfico na Figura 28 mostram o comportamento de um concentrador solar dimensionado com parâmetros de Caruaru e aplicado em Porto Alegre, levando em consideração os dados citados anteriormente. A *Radiação Total Horizontal Média Mensal* de Caruaru e Porto Alegre – RS também representam outra versão da Tabela 3: A geração de energia de um CPC produzido em uma cidade e aplicado em outra.

Figura 28 - Comportamento da aplicação dos CPCs em ambas as cidades.



Fonte: O Autor (2025)

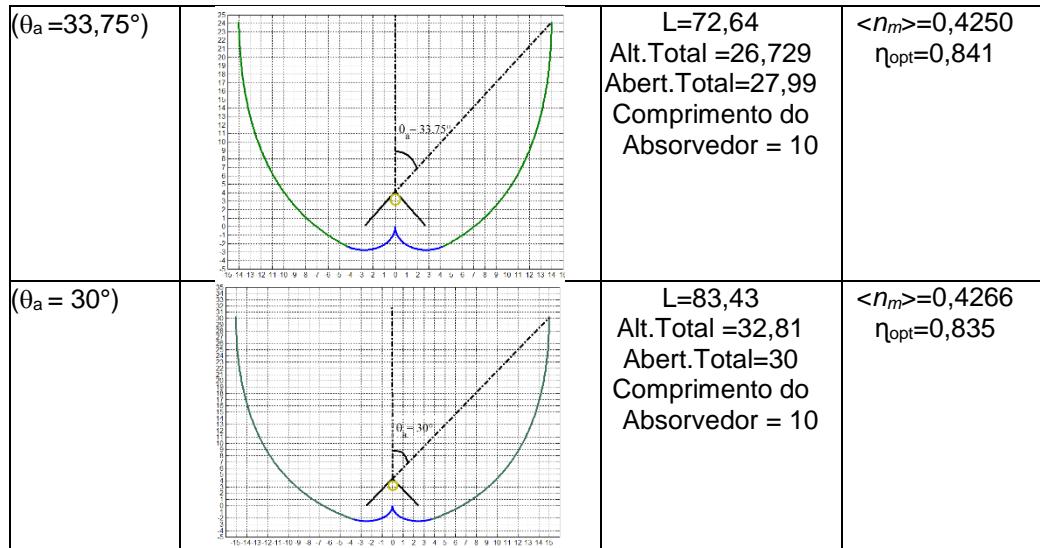
Observando as curvas, o desempenho do CPC está diretamente ligado à disponibilidade energética local, aplicando-se as mesmas características do coletor em situação de *Irradiação* distinta. A curva de eficiência foi medida na incidência normal de radiação, porém, na maioria dos coletores, a eficiência ótica muda com o ângulo de incidência. A equação do balanço energético (equação 31) que resume o desempenho de um CPC com absorvedor V invertido, considerando a equação de perdas *U* (equação 30).

5.1.3 Análise dos truncamentos para melhor desempenho térmico dos CPCs

Baseado nos parâmetros da dissertação de (Brandão, 2004), no qual foram realizadas análises geométricas, ótica para escolha do ângulo de truncamento ideal, geração de energia gerada para localidade de Recife - PE, utilizando parâmetros de radiação inclinada, difusa, direta e variações de temperatura transitórias ao longo do ano com concentradores oriundos de ângulos de aceitação variando de 33,75° a 45,58°. A partir dessa análise foi possível realizar um levantamento do comportamento energético, abrangendo os CPCs completos com ($\theta_a = 65^\circ$; 56.4° ; 50° ; 45.6° ; 38.7° ; 33.75° , 30°), conforme apresenta o Quadro 2.

Quadro 2 – Configurações analisadas de CPCs

Tipo CPC	Figura Truncada	Prop. Geométricas (unidades)	Propriedade Óticas
$(\theta_a = 65^\circ)$		$L=43,24$ Alt.Total =11,55 Abert.Total=21,03 Comprimento do Absorvedor = 10	$\langle n_m \rangle=0,4345$ $\eta_{opt}=0,860$
$(\theta_a = 56,40^\circ)$		$L=47,61$ Alt.Total =14,01 Abert.Total=22,00 Comprimento do Absorvedor = 10	$\langle n_m \rangle=0,4347$ $\eta_{opt}=0,856$
$(\theta_a = 50^\circ)$		$L=51,70$ Alt.Total =16,72 Abert.Total=23,05 Comprimento do Absorvedor = 10	$\langle n_m \rangle=0,4324$ $\eta_{opt}=0,853$
$(\theta_a = 45,60^\circ)$		$L=55,20$ Alt.Total =18,09 Abert.Total=23,98 Comprimento do Absorvedor = 10	$\langle n_m \rangle=0,4292$ $\eta_{opt}=0,850$
$(\theta_a = 38,70^\circ)$		$L=63,58$ Alt.Total =22,334 Abert.Total=25,98 Comprimento do Absorvedor = 10	$\langle n_m \rangle=0,4264$ $\eta_{opt}=0,845$



Fonte: O Autor (2024)

A Tabela 4 resume os melhores resultados de desempenho apresentado pelas configurações dos aparelhos com suas concentrações nominais, indicando o somatório das razões de energia anual gerada pelo CPC para as cidades de Caruaru-PE e Porto Alegre - RS.

Tabela 4 – Razão anual de energia gerada pelo CPC nas duas cidades

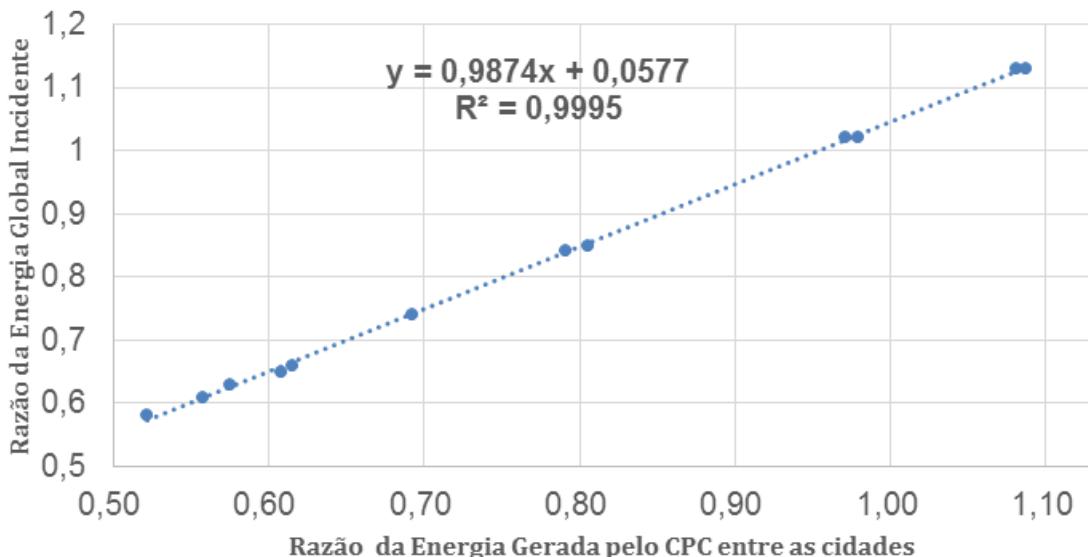
Concentração nominal	Soma Anuais de Energia Gerados pela CPC. Energia Caruaru/ Energia RS
$\theta_a = 65,00^\circ (C=1,1)$	16,03
$\theta_a = 56,4^\circ (C=1,2)$	9,86
$\theta_a = 50,00^\circ (C=1,3)$	15,46
$\theta_a = 45,60^\circ (C=1,4)$	15,46
$\theta_a = 38,70^\circ (C=1,4)$	15,46
$\theta_a = 33,75^\circ (C=1,8)$	15,46
$\theta_a = 30,00^\circ (C=2,0)$	15,46

Fonte: O Autor (2025)

Melhor desempenho relativo foi do CPC com (θ_a) = 56,40° (C=1,2), pois os valores da energia gerada por ele, entre ambas as cidades, ficaram próximas, ou seja, a menor razão entre ambas e melhor que todas as possibilidades de configurações testadas. Assim, o desempenho da menor energia gerada pelo CPC (Porto Alegre) se aproximou mais da maior (Caruaru) com coletores desta configuração. No gráfico da Figura 29, a equação da reta y (variável dependente) = $0,9874x$ (variável independente) mostra que a razão da energia gerada pelo CPC é diretamente proporcional à razão da irradiação solar disponível, com um coeficiente muito próximo de 1. Isso comprova que o desempenho do coletor é consistente e previsível em diferentes climas. O valor de R^2 (Coeficiente de Determinação) = 0,9995 confirma que este modelo linear é

estatisticamente quase perfeito, explicando 99,95% do comportamento dos dados. Juntos, esses fatores validam a robustez do CPC Padrão.

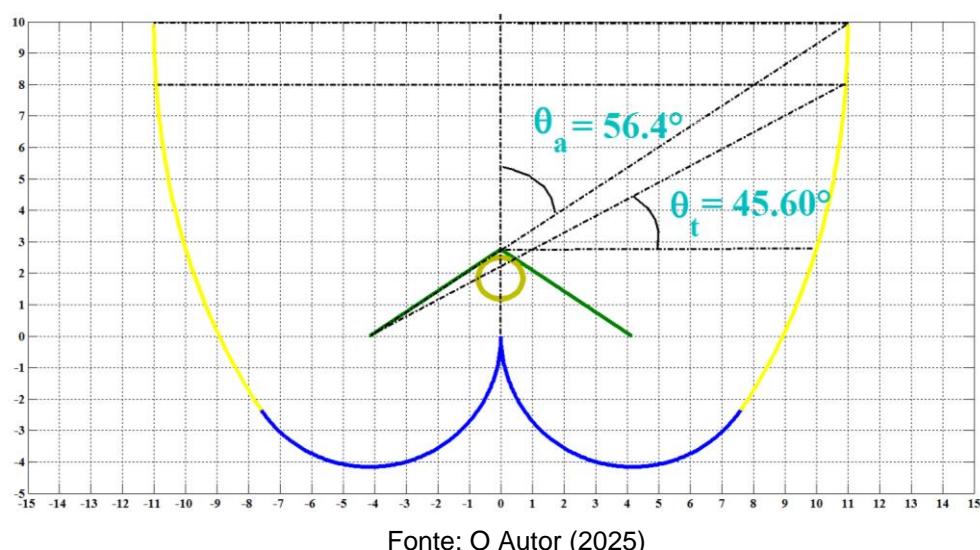
Figura 29- Gráfico da razão entre as energias geradas pelo CPC



Fonte: O Autor (2025)

A Figura 30 mostra o perfil da configuração do CPC, correspondendo o de melhor desempenho térmico. Reduzindo, a apenas esta configuração, ao invés de um faixa entre 30° a 65°, sendo ele o concentrador *Padrão*.

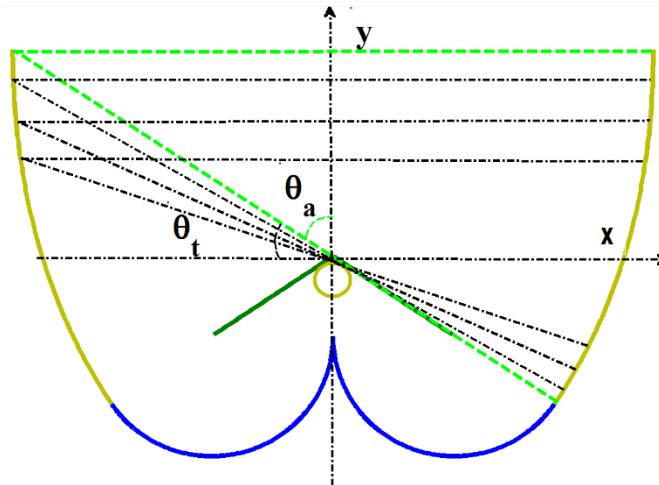
Figura 30 - CPC Padrão com $\theta_a=56,40^\circ$ e $\theta_t=46,60^\circ$.



Fonte: O Autor (2025)

A Figura 31 representa os possíveis ângulos de truncamento (seccionamento), quando ($\theta_a > \theta_t$), em relação a horizontal x e 2º quadrante.

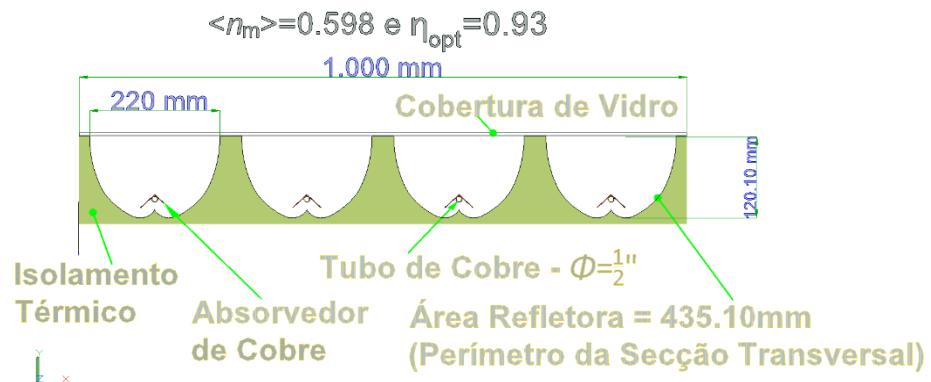
Figura 31- Representação do ângulo de aceitação θ_a e os de truncamento θ_t .

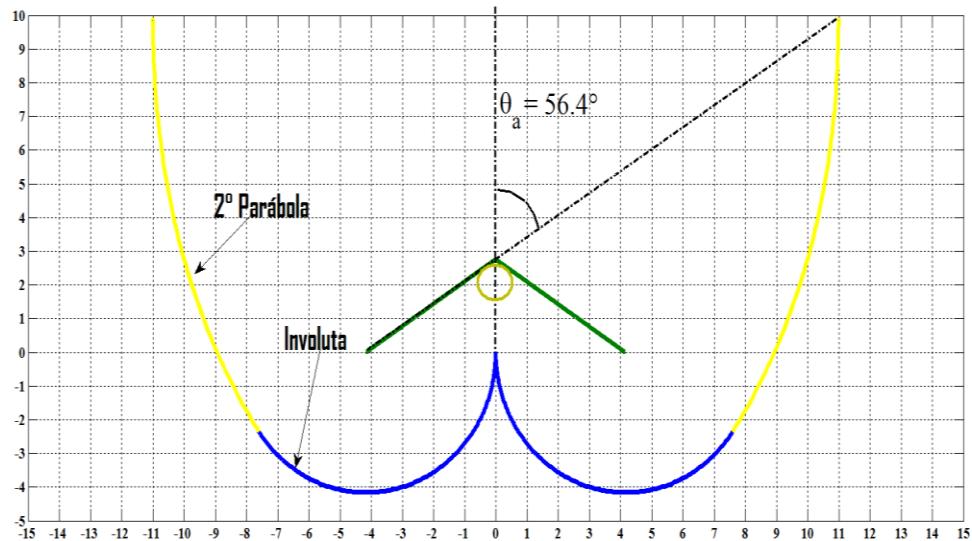
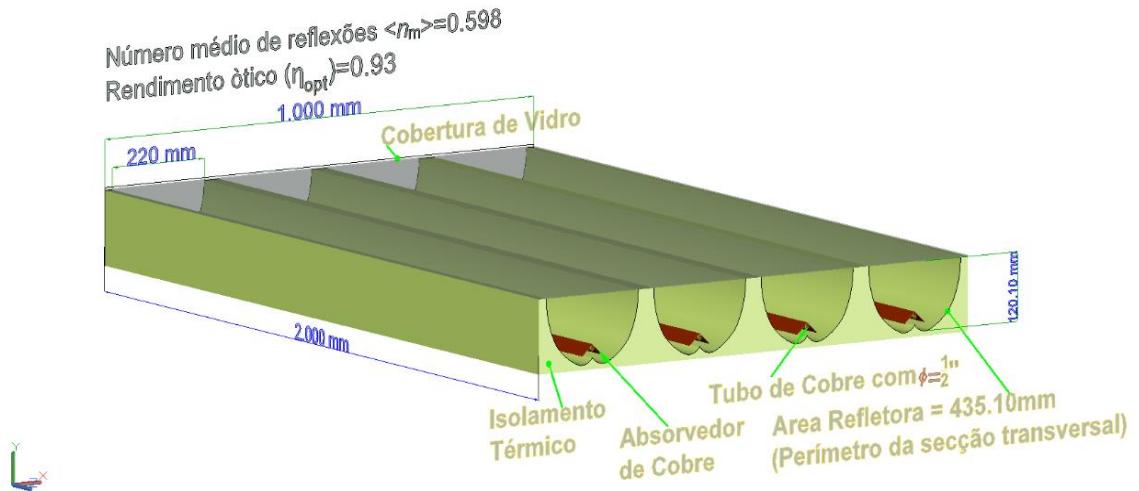


Fonte: O Autor (2025)

A versão otimizada (truncada) e a secção transversal do CPC é mostrada na Figura 32, revelando as dimensões, número médio de reflexões e desempenho óptico para construção e aplicação do aparelho padrão.

Figura 32 - Dimensionamento (truncada) do CPC Padrão.

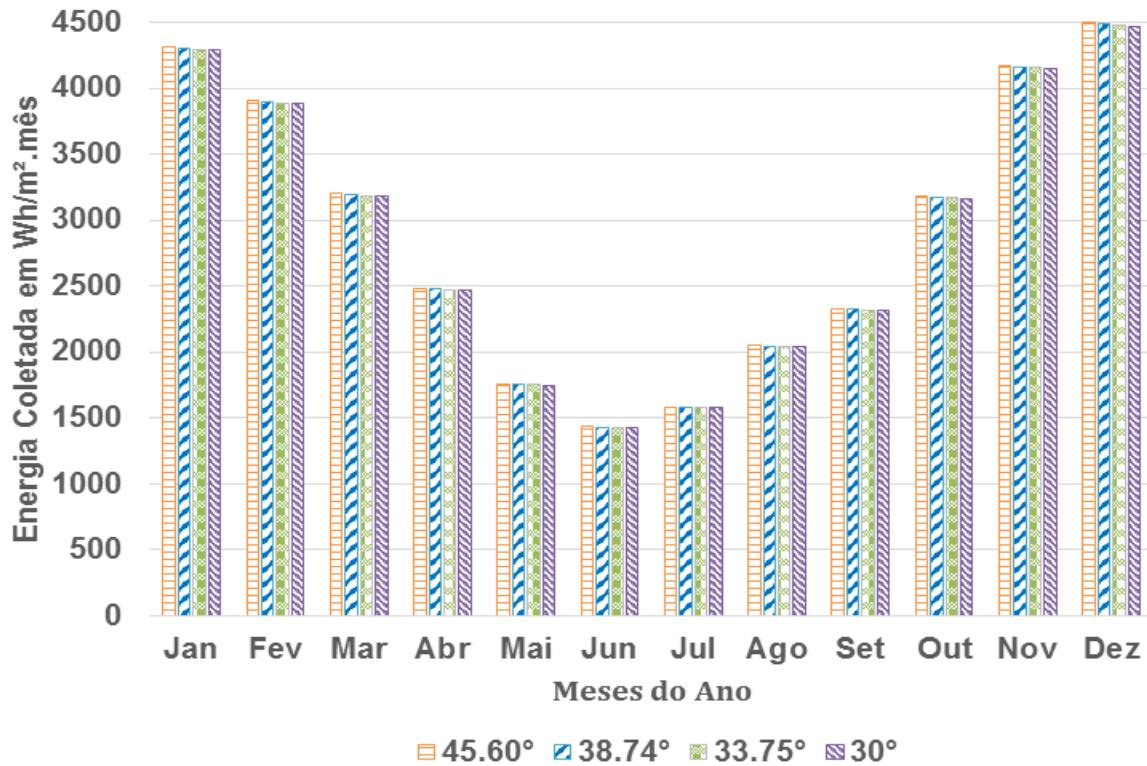




Fonte: O Autor (2025)

O ângulo de abertura de $56,6^\circ$ com truncamento de $45,60^\circ$ mostrou maior energia gerada mensalmente. Na Figura 33 isso também pode ser observado, onde mostra em barras a taxa da distribuição mensal de energia coletada dos 12 meses do ano.

Figura 33 - Distribuição mensal dos 12 meses do ano da energia gerada pelos CPCs.



Fonte: O Autor (2025)

A Tabela 5 exibe os dados do CPC Padrão, com algumas alterações em seus parâmetros, com relação ao CPC completo, por conta do efeito de truncamento.

Table 5 - Dados de truncamento do CPC padrão

Novas dimensões após truncamento (cm)	Número médio de reflexões e desempenho óptico	Taxa de energia gerada após truncamento	Eficiência Térmica: $\eta = \frac{\text{Energia Gerada}}{\text{Radiação Incidente}}$
$L_t=43,51$ $Altura_t=12,01$ $Abertura_t=22,00$ $Absorvedor=10$	$\langle n_m \rangle = 0,598$ $\eta_{opt}=0,93$	Efeito em Caruaru e aplicado em Porto Alegre: 34.918,28Wh/m².(ano)	0,67

Fonte: O Autor (2025)

A Tabela 6 mostra os vetores dos resultados obtidos da energia gerada pelo CPC Padrão ($\theta_a=56,40^\circ$) dos diferentes graus de truncamento, mês a mês. Calculadas pelas equações (31) e (32) do balanço para coletores.

Table 6 - Valores de energia média diária mensal gerada pelo CPC Padrão (Wh/m²)

Mês\θ _t	45.60°	38.74°	33.75°	30.00°
Jan	4313,23	4302,35	4294,28	4286,41
Fev	3905,83	3895,93	3888,6	3881,44
Mar	3200,17	3191,99	3185,93	3180,01
Abr	2484,78	2478,34	2473,56	2468,9
Mai	1760,36	1755,67	1752,2	1748,81
Jun	1434,99	1431,10	1428,21	1425,39
Jul	1584,47	1580,21	1577,05	1573,97
Ago	2050,27	2044,88	2040,88	2036,98
Set	2329,75	2323,68	2319,18	2314,79
Out	3182,10	3173,96	3167,93	3162,04
Nov	4173,49	4162,94	4155,13	4147,5
Dez	4498,85	4487,52	4479,12	4470,92

$$\sum \text{ (Acumulado anual em Wh/m}^2\text{)} = \mathbf{34918,28} \quad \mathbf{45,60}^{\circ}$$

$$\sum \text{ (Acumulado anual em Wh/m}^2\text{)} = 34828,57 \quad 38,74^{\circ}$$

$$\sum \text{ (Acumulado anual em Wh/m}^2\text{)} = 34762,08 \quad 33,75^{\circ}$$

$$\sum \text{ (Acumulado anual em Wh/m}^2\text{)} = 34697,17 \quad 30,00^{\circ}$$

Fonte: O Autor (2025)

Os valores dos somatórios (\sum), abaixo da Tabela, indicam a soma da energia gerada pelos CPCs dos meses entre janeiro e dezembro por cada uma de suas configurações. Observando uma maior geração de energia anual para o CPC de truncamento ($\theta_t=45,60^{\circ}$). O valor de 34918,28 Wh/m², corresponde a uma taxa de geração de energia por metro quadrado

5.2 BALANÇO ENERGÉTICO DA PLANTA DE BIODIESEL

Nesta Seção serão apresentados os consumos energéticos das principais etapas de produção da planta piloto. Inicialmente, foi realizado também um balanço energético da etapa de produção do óleo vegetal, considerando desde a extração até o pré-tratamento do insumo. Essa escolha se deveu à possibilidade de interpretar o sistema de forma mais ampla, em uma perspectiva de ciclo de vida, o que permitiria avaliar o valor energético agregado desde a origem da matéria-prima. Assim, em um primeiro momento, cogitou-se utilizar a soma das demandas energéticas da produção do óleo e da transesterificação como referência para o cálculo do número de CPCs necessários. Contudo, para fins de dimensionamento do sistema heliotérmico, o balanço energético relevante é aquele restrito ao processo de transesterificação, etapa diretamente dependente de aquecimento e efetivamente suprida pelo sistema

solar. Dessa forma, adotou-se como base para o cálculo a potência térmica dos quatro processos, correspondente às necessidades energéticas exclusivas da produção de biodiesel, sem considerar a etapa de produção do óleo vegetal. Ainda assim, a abordagem inicial não é descartada como exercício de análise, pois abre caminho para futuros trabalhos que venham a integrar o conceito de análise energética de ciclo de vida ao dimensionamento de sistemas heliotérmicos em biocombustíveis.

5.2.1 Esmagamento de grãos: Tempo e energia consumida

A Tabela 7 exibe a tomada do tempo de funcionamento das máquinas (aferido individualmente por equipamento de acordo com a Seção 4.5.1), bem como o valor da *Potência Excedente Registrada* – PER que representa seu valor incrementado, quando as máquinas são submetidas aos esforços de processos no esmagamento. Serão utilizados os dados energéticos medidos em cada equipamento da planta que demanda energia para seu funcionamento, cuja metodologia e resultados serão apresentados para o esmagamento de 6400 kg de semente de algodão *in natura*.

Para quantificar o PER, foi realizado um balanço energético horário que comparou a potência térmica disponível dos coletores solares com a demanda térmica instantânea do processo de produção de biodiesel. $PER = Q_{disponível,solar} - Q_{demanda,processo}$ Onde: $Q_{disponível,solar}$ é calculada com base na irradiação solar incidente, na área de abertura dos coletores e na eficiência térmica dos CPCs (Tabelas 5 e 6). A $Q_{demanda,processo}$ foi determinada a partir do balanço energético consolidado para as quatro etapas de produção, conforme detalhado na Tabela 10. A análise do PER permitiu:

1. Identificar Padrões de Geração e Consumo: Foram gerados perfis diários/mensais do PER para compreender a dinâmica entre a oferta solar e a demanda do processo ao longo do período analisado;
2. Dimensionamento de Sistemas de Armazenamento: A magnitude e a duração dos períodos de PER são cruciais para a proposição e o dimensionamento preliminar de um sistema de armazenamento de energia térmica, visando a maximização do uso da energia solar e a garantia da continuidade do processo em momentos de ausência solar;

3. Estratégias de Gestão de Energia: Com base na análise do PER, é possível exploradas estratégias para otimizar a utilização do excedente térmico, como a redistribuição para outras cargas de menor prioridade ou a acumulação para uso posterior;
4. Avaliação da Viabilidade Técnica: A quantificação do PER contribuiu para a avaliação da robustez e da flexibilidade do sistema solar proposto, demonstrando a capacidade de atender à demanda e, potencialmente, de gerar um excedente que pode ser gerido para melhorar a eficiência energética global da planta.

Tabela 7 – Tempo e energia consumida no processo de esmagamento

Máquinas e Processos	Horas	PER (kW)	Energia (MJ)
Transportadores helicoidais	0,44	6,9	10,93
Peneira vibratória	0,79	3,37	9,58
Moinho martelo	0,68	4,40	10,77
Elevador de caneca para o pré-aquecedor	0,3	1,82	1,96
Cozinhador	1,4	1,76	8,87
Prensas 1 e 2 500kg/hora + Bomba	3,34	18,30	220,04
Tanque pulmão 1	2,13	1,69	12,95
Neutralizador	2,10	2,74	20,71
Filtro prensa + Bomba	2,10	13,97	105,61
Tanque pulmão 2	2,13	1,77	13,57
Pré-aquecedor + Desumidificador + Bomba	2,10	8,16	61,69
Total Maquinários	$\Sigma = 17,51$	$\Sigma = 64,88$	$\Sigma = 476,68$

Fonte: O Autor (2016)

Comparando os valores obtidos na Tabela 7, o maior tempo e PER registrados foram das Prensas 1 e 2. Os valores correspondem a 19% e 28% do tempo e PER, respectivamente, revelando que o tipo de oleaginosa submetido ao esmagamento para obtenção de óleo vegetal e um tempo mais curto com um maquinário mais eficiente influencia diretamente no balanço de energia, pois estas grandezas serão levadas em conta para o Gasto Energético do Grão no Processo de Extração do Óleo (Tabela 8). Um alto consumo de energia para uma baixa produção de óleo pode indicar ineficiências no processo, por isso devem ser discutidas variações no consumo de energia em diferentes condições operacionais, por exemplo, diferentes velocidades de operação. Eis a importância de monitorar o tempo e a energia consumida no processo de esmagamento, pois processos que consomem menos energia não apenas reduzem custos, mas também têm um menor impacto ambiental.

5.2.2 Balanço energético para produção de óleo bruto de algodão

O balanço energético para produção de óleo bruto de algodão (Tabela 8) apresentou um valor de 35.863,12MJ, sendo grande parte (50,21% proveniente da fonte biológica na entrada do balanço) e 33,42% com 16,09% de participação dos produtos de saída, torta de algodão e óleo. Atingiram uma eficiência energética de 277,27, ou seja, para cada unidade de energia não renovável aplicada, foram obtidas 277,27 unidades energéticas do produto. Ela foi obtida pela razão entre a quantidade de óleo vegetal produzida (d_2) e o somatório das fontes não renováveis, ou seja: ($\sum b$ =graxa + óleo lubrificante). O balanço energético na extração de óleo vegetal foi ($d_2 - \sum b$).

Tabela 8 - Balanço energético na produção de óleo de algodão (MJ.kg).

Fonte e forma	Quant.	Coef.(MJ/kg)	Ener.Cons.(MJ)	(%)
Entradas				
Biológica (a)				
Sementes	6400kg	17,55	<u>112.320,00</u>	50,21
Fósseis (b)				
Graxa	1,5 kg	43,40	<u>65,10</u>	0,029
Óleo Lubrificante	1,8 kg	37,71	<u>67,88</u>	0,030
Industrial (c)				
Maquinários do esmagamento	--	--	476,68	0,213
\sum Entradas			112.929,76	
Saídas				
Produtos (d)				
Torta de algodão (d_1)	5.440 kg	13,74	<u>74.754,60</u>	33,42
Óleo de algodão (d_2)	915 kg	39,34	<u>35.996,10</u>	16,09
\sum Saídas			110.750,70	
Eficiência Energética	277,27			
Balanço			35.863,12	100,00

Fonte: O Autor (2016)

Após esse mapeamento, foi calculado o *Gasto Energético do Grão no Processo de Extração do Óleo* que corresponde a massa do produto vezes seu coeficiente energético ($6.400\text{kg} \times 17,56\text{MJ}.\text{kg}^{-1}$); *Gasto Energético do Óleo de Algodão* ($915\text{ kg} \times 39,34\text{ MJ}.\text{kg}^{-1}$) e *Gasto Energético do Farelo de Algodão* ($5.440\text{ kg} \times 13,74\text{ MJ}.\text{kg}^{-1}$). Em uma comparação com outros trabalhos semelhantes, publicados, Pfromm et al., (2011) encontraram 7,55 MJ no balanço energético, analisando algas em Kansas - EUA, extraídas de uma área com 25m^2 . Uma observação relatada por Fereidooni et al., (2018) é que a fase de extração do óleo foi em função do cálculo de consumo energético que está relacionado apenas às entradas e saídas principais (grãos de

soja, óleo bruto e farelo), não se atendo a outras entradas e saídas tais como: energia elétrica, mão de obra, prensa entre outras; sugerindo, o mesmo, maiores estudos.

5.2.3 Correlação entre tempo e energia da produção

Na Tabela 9 são verificadas a energia e o tempo de duração da fase de produção de biodiesel; 2730,64 MJ e 26,01hs respectivamente, assim o tempo total do processo industrial foi: 43,52hs (sendo 17,51hs para esmagamento e 26,01hs para transesterificação com a usina automatizada).

Tabela 9 – Energia consumida no processo de fabricação do biodiesel

Máquina e Processo	Horas	PER (kW)	Energia (MJ/t)
Preparação do catalisador	1,44	2,00	10,37
Transesterificação	3,56	60,77	778,82
Recuperação do álcool da fase pesada	3,48	58,17	728,75
Destilação do álcool recuperado	10,50	18,25	689,85
Lavagem do biodiesel	2,20	11,17	88,46
Relavagem do biodiesel	0,90	11,10	35,96
Desumidificação do biodiesel	3,93	28,16	398,41
Total processos	$\Sigma=26,01$	$\Sigma=189,61$	$\Sigma=2.730,64$

Fonte: O Autor (2016)

O óleo de algodão bruto foi transformado em biodiesel por rota metílica. Para avaliação do balanço energético, foram produzidos 1000 litros de óleo bruto que é considerado como entradas energéticas: o somatório da energia dos equipamentos para esmagamento foi de 476,68 MJ, catalisador (KOH (s)) utilizado na reação (6 kg), massa de óleo de algodão (915 kg), metanol (161,57 kg) de 6400 kg de semente de algodão que produziram 5.440 kg de torta ou farelo. As saídas energéticas foram: biodiesel de algodão (745,85 kg) e glicerina (79,84 kg). Ainda como resíduo 94,3 kg de borra de neutralização com 69% da sua composição de água, 29,5% de sabão e 1,5% de óleo puro, o qual não foi considerado no balanço.

A Tabela 10 mostra que o balanço energético para produção de biodiesel de algodão foi de 27.738,19 MJ/t e atingiu uma eficiência energética de 9,15 (índice multiplicador), ou seja, para cada unidade de energia não renovável (metanol) aplicada à produção, obteve-se 9,15 unidades energéticas do produto.

Tabela 10 - Balanço na produção de 1000 litros biodiesel de algodão (MJ)

Processo	PER(kW)/PCI(MJ.kg ⁻¹)	Tempo(h)/Massa(kg)	Energia Consumida (MJ)	(%)
Entradas				
Industrial(a)				
Preparação da solução	2,00	1,44	10,37	0,013
*Transesterificação	*60,76	*3,56	*778,82	*0,98
*Recuperação do álcool da fase pesada	*58,17	*3,48	*728,75	*0,98
*Destilação do álcool recuperado	*18,25	*10,50	*689,85	*0,87
Lavagem do biodiesel	11,17	2,20	88,46	0,11
Relavagem do biodiesel	11,07	0,90	35,96	0,045
*Desumidificação do biodiesel	*28,10	*3,93	*398,41	*0,50
Químico				
Catalisador (KOH _(s))	45,44 MJ.kg ⁻¹	75kg	3.408,00	4,29
Metanol (a)	21,05 MJ.kg⁻¹	161,57kg	3.401,05	4,28
Biológico				
Óleo de algodão	39,34 MJ.kg ⁻¹	915kg	35.996,10	45,36
Σ Entradas			45.585,72	
Saídas				
Produtos				
Biodiesel de algodão (b)	41,75 MJ.kg⁻¹	745,85 kg	31.139,24	28,04
Glicerina	33,20 MJ.kg ⁻¹	79,84kg	2.650,70	2,39
Σ Saídas			33.759,93	
Eficiência Energética(b/a)	9,1557			
Balanço (b-a)			27.738,19	

Fonte: O Autor (2016)

A eficiência é calculada pela razão entre a energia consumida (MJ) para obtenção do biodiesel (b) e a quantidade de energia consumida de metanol (a), são os 2 termos de energia consumida sublinhados na tabela. O resultado do balanço energético é a diferença entre os dois termos (b-a).

Assim sendo, o valor de 9,15 atingido representa um sistema eficiente energeticamente, pois o indicador obtido apresentou-se superior a 1 (um) (Risoud, 1999). No entanto, a elevada dependência de fontes de energia industrial e fóssil, pode comprometer a eficiência energética do sistema no longo prazo. Com a introdução de um elemento sustentável para produzir biodiesel, ou seja, utilização de etanol na transesterificação, o valor da eficiência energética seria o valor energético desse produto dividido por sua unidade - os 4 processos que requerem calor estão em asterisco na Tabela 10, 1º coluna.

5.2.4 Rendimento bruto da produção de biodiesel

Foram produzidos ($m_{Biodiesel}$) 745,85 kg de biodiesel com ($m_{Óleo\ de\ Algodão}$) 915 kg de óleo de algodão (matéria prima). Esses resultados são importantes para avaliar a eficiência térmica de uma usina de biodiesel que depende de vários fatores, incluindo a tecnologia utilizada, o tipo de matéria-prima e o processo de produção. Avaliando toda a produção de biodiesel (Tabela 10), considerando o plantio de 3 hectares de área para obter 6.400 kg de sementes de algodão e, posteriormente, 1.000 litros de biodiesel por ciclo. O rendimento bruto para o processo de produção de biodiesel da Usina de Caetés foi definido como a razão entre a massa de combustível produzida e a quantidade de óleo vegetal utilizada, resulta em:

$$R_{RenB} = 100 \times \frac{m_{Biodiesel}}{m_{Óleo\ de\ Algodão}} = \frac{745,85}{915} = 81,51\% \quad (53)$$

A Tabela 11 mostra uma síntese da avaliação de todo processo para produção do biodiesel de algodão, considerando a produção em 3 três hectares de área para obtenção de 6400 kg de sementes de algodão e, posteriormente, 1000 litros de biodiesel: onde se verifica um tempo de produção de 17,51 horas e consumo de 35863,12 MJ para produzir óleo vegetal e 26,10 horas e 27.738,19 MJ, respectivamente, para transformá-lo em biodiesel.

Tabela 11 - Balanço energético da produção de biodiesel de algodão em 3ha.

Etapa	Tempo	Balanço energético	Participação
	Horas	MJ	%
Obtenção de óleo bruto	17,51	35.863,12	56,39
Produção de biodiesel	26,01	27.738,19	43,61
TOTAL	43,52	63.601,31	100,00

Fonte: O Autor (2016)

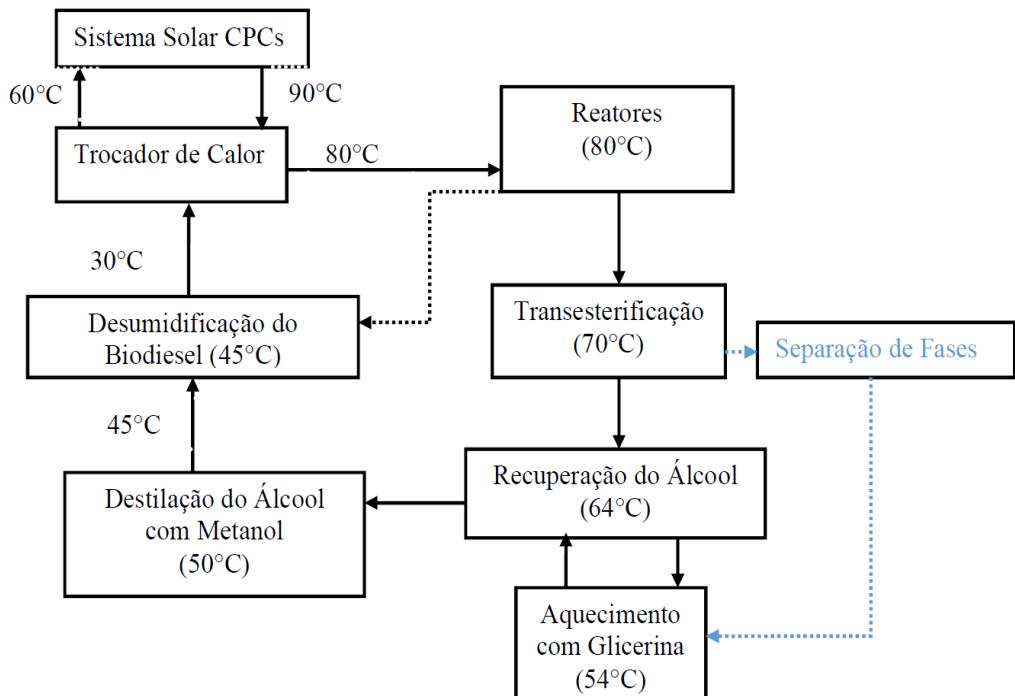
A obtenção de óleo foi desproporcional à energia consumida na transesterificação, pois se trata de um processo químico e o esmagamento mecânico, consumindo mais energia devido ao maquinário empregado. Como dito, a prensagem dos grãos influenciou muito no resultado final do balanço. Como exemplo comparativo, obviamente, o dendê é uma oleaginosa mais fácil de esmagar e com grande teor de

óleo, mas suas aplicações estão mais voltadas para a indústria de cosméticos. Para que haja elevados índices de energia no balanço é necessária uma grande quantidade de produto final ou um significativo coeficiente energético do elemento diretamente relacionado, como nem sempre é possível alterar estes dois fatores, a maneira de viabilização do balanço é inserir na matriz energética alternativa renovável.

5.3 PROJETO DO SISTEMA DE INTEGRAÇÃO TÉRMICA

Uma vez definido o Coletor Padrão e o balanço energético da produção, procedeu-se ao dimensionamento dos equipamentos necessários para integrar o campo solar à planta de biodiesel, garantindo a transferência de calor eficiente para o processo. Assim, serão expostos o dimensionamento dos equipamentos sugeridos para integração do sistema de geração de energia solar na produção da Usina de Caetés, levando em conta o processo de transesterificação do óleo vegetal. As considerações são relativas aos princípios utilizados na Seção 4.4.1. A Figura 34 mostra os processos que requerem aquecimento por óleo térmico e suas respectivas estimativas de temperaturas de reação – indicadas pelo administrador da usina pilotos valores fora dos retângulos, representam as temperaturas de entrada e saída do processo: transesterificação (60,76kW); recuperação do álcool (58,17kW); destilação do álcool recuperado (18,25kW) e desumidificação do biodiesel (28,10kW). A ligação entre os reatores e a desumidificação do biodiesel, linha pontilhada, indica uma pilotagem ao qual é cedido calor de um para outro processo. Esses dados serão considerados para cálculo dos equipamentos da integração e mostrados na Tabela 10.

Figura 34 - Fluxograma do processo



Fonte: O Autor (2025)

Para atender a demanda energética dos 4 processos citados, ou 7,69 KWh. O CPC Padrão com dimensões (2 x 1) m gera 0,647kW h (Tabela 6) e rendimento aproximado de 70%, resultando em aproximadamente 18 CPCs Padrão, com área de superfície 3,80 m² cada célula, ficando (18. 2) m = 32 m² (5,66 m por 5,66 m) de área total, aquecendo fluido térmico de baixo peso específico. Os CPCs operam com 70% de eficiência real (Rabl, 1976).

$$Q_{Util} \text{ por CPC} = 0,647 \times 0,70 = 0,4529 \text{ kW}$$

$$N_{No\min al} = \frac{7,69}{0,4529} \Rightarrow 17,20$$

Serão necessários 18 CPCs para suprir a carga térmica, considerando perdas atuantes.

5.3.1 Procedimento geral de dimensionamento

Na pesquisa, foi utilizado um trocador de calor casco e tubo em contracorrente, devido à sua robustez, facilidade de limpeza e compatibilidade com sistemas de aquecimento solar para aplicações em biodiesel.

Tipo de Trocador:

- Trocador de calor casco e tubo em contracorrente, com 10 tubos internos.
- Utilizado para aquecimento de Dowtherm A no interior dos tubos, com água aquecida pelo CPC circulando no casco.

Escolha dos Parâmetros:

1. Dimensionamento Preliminar:

- Baseado na potência térmica desejada (7,690 kW), soma do consumo energético dos 4 processos citados definida pelo sistema solar.
- Definida a temperatura de entrada e saída do fluido quente e frio (entrada ~30°C, saída ~80-90°C).
- Utilização de capacidade térmica, densidade e viscosidade do Dowtherm e da água.

2. Critérios de Seleção:

- r)** Facilidade de fabricação com materiais disponíveis.
- s)** Compatibilidade térmica e química com os fluidos.
- t)** Relação entre área de troca térmica e volume do trocador, visando eficiência e custo reduzido.

3. Dimensionamento Técnico:

- Aplicação do método de Diferença de Temperatura Logarítmica Média (DTLM) para determinar área necessária:

Simplificações para o projeto de dimensionamento:

- Desprezo de perdas laterais insignificantes;
- Propriedades do fluido (Dowtherm/água) consideradas constantes na faixa de operação (25–90°C);
- Eficiência óptica assumida como constante para cada configuração de CPC, com ajuste conforme ângulo de incidência médio diário;
- Desconsideração de variações de vento e poeira em simulações preliminares.

a) Escolha das bitolas da tubulação ($D_f=20$ e $D_e=23$ mm)

- **Restrição Geométrica (O 'Gap' do Absorvedor):** Este foi o fator principal. O projeto do coletor utiliza um absorvedor em V invertido com uma largura de base total de **10 cm**. O tubo de cobre é o componente central deste conjunto. Um diâmetro de 20 mm é geometricamente compatível e proporcional a essa largura, permitindo uma construção robusta do 'V' sem comprometer o espaço e mantendo as proporções óticas do projeto original de Brandão (2004);
- **Disponibilidade Comercial (A 'Bitola'):** Do ponto de vista prático e de custo, tubos de cobre de **20 mm** são uma das bitolas mais comuns, padronizadas e economicamente viáveis disponíveis no mercado. A escolha de uma medida não padrão aumentaria desnecessariamente o custo e a complexidade de fabricação do coletor (Telles, 2000);
- **Condições de Escoamento (A Carga Térmica):** Indiretamente, a carga térmica influencia a decisão. A energia captada pelo coletor precisa ser removida por uma vazão de fluido, (Rabl, 1976). Para a ordem de grandeza da energia gerada por este CPC, uma tubulação de 20 mm permite que a vazão necessária escoe a uma velocidade adequada, garantindo um bom coeficiente de transferência de calor por convecção, sem gerar uma perda de carga excessiva que exigiria uma bomba mais potente e mais cara.

5.3.2 Demanda térmica do trocador de calor

Utilizando um trocador casco e tubos de aço inox genérico com as seguintes propriedades:

- O óleo térmico (Dowtherm A) circula por dentro dos tubos;
- A água aquecida pelo sistema solar circula no casco;
- Aquecer o óleo térmico até uma temperatura adequada à transesterificação do biodiesel (~60–70 °C).

a. Dados geométricos de entrada:

Diâmetro interno do tubo	(m)	$D_i = 0,020$
Diâmetro externo do tubo	(m)	$D_o = 0,023$
Comprimento estimado dos tubos (m)		$L = 1,2$
Número de tubos		$N_t = 10$
Área da seção transversal	(m ²)	$A_{tubo} = \frac{\pi \cdot (D_i)^2}{4} = 3,142 \times 10^{-4}$
Área total	(m ²)	$A_{total} = A_{tubo} \cdot N_t = 0,0031$
Espessura da parede	(m)	$\delta = D_o - D_i = 3 \times 10^{-4}$
Condutividade térmica do aço inox (W/m. K)		$k_{tubo} = 20$

O comprimento de 1,2 m para os tubos, não foi um resultado final derivado de uma fonte, mas sim um comprimento estimado inicial. Ele serviu como um ponto de partida ou uma premissa de projeto para a memória de cálculo (Duffie & Beckman (2013)).

Na prática de projetos de engenharia é comum iniciar o dimensionamento com uma geometria preliminar — neste caso, a de um trocador de calor relativamente compacto — para, em seguida, verificar analiticamente se essa geometria atende aos requisitos térmicos da aplicação, Incropera et al. (2007). O objetivo de toda a memória de cálculo que se seguiu é justamente validar ou, se necessário, corrigir essa estimativa inicial

A conclusão da análise demonstrou que essa premissa de 1,2m era insuficiente para a carga térmica necessária. O cálculo da área de troca térmica requerida (5,36 m²) levou à determinação de um comprimento de tubo final com 7,42 m.

Portanto, o valor de 1,2 m não tem uma fonte teórica, mas sim um papel metodológico: foi a premissa de entrada que permitiu ao método de cálculo analítico gerar o resultado final.

b. Vazão de óleo térmico (Dowtherm A):

Admitindo uma vazão de 100 ℓ /h, convertendo para m^3/s $V_{oleo_m3s} = \frac{(100/1000)}{3600}$

Peso específico do óleo (kg/m^3) $\rho_{oleo} = 750$

Vazão mássica do óleo (kg/s) $m_{oleo} = V_{oleo_m3s} \rho_{oleo} = 0.0208$

c. Propriedades do óleo térmico (DOW CHEMICAL COMPANY, 2020):

Viscosidade cinemática do óleo ($\text{Pa}\cdot\text{s}$) $\mu c_{oleo} = 3.5 \times 10^{-3}$

Calor específico do óleo ($\text{J}/\text{kg}\cdot\text{K}$) $cp_{oleo} = 2300$

Condutividade térmica do óleo ($\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$) $k_{oleo} = 0,13$

d. Propriedades da água solar (Incropora et al., 2007):

Peso específico da água a 60°C (kg/m^3) $\rho_{Água} = 983$

Viscosidade cinemática da água ($\text{Pa}\cdot\text{s}$) $\mu c_{Água} = 4,6 \times 10^{-4}$

Calor específico da água ($\text{J}/\text{kg}\cdot\text{K}$) $cp_{água} = 4180$

Condutividade térmica da água ($\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$) $k_{água} = 0,65$

e. Temperaturas de entrada e saída

Temperatura de entrada do óleo ($^\circ\text{C}$) $T_{EntradaÓleo} = 30$

Temperatura de saída do óleo ($^\circ\text{C}$) $T_{SaídaÓleo} = 80$

Temperatura de entrada da água ($^\circ\text{C}$) $T_{EntradaÁgua} = 90$

Temperatura de saída da água ($^\circ\text{C}$) $T_{SaídaÁgua} = 60$

f. Demanda térmica dos CPCs

Demanda térmica (W) $Q_{demanda} = 7,69\text{kW}$

Potência útil por CPC (W) $Pot_{CPC} = 0,64\text{kW}$

Eficiência estimada do CPC $\eta_{ef,CPC} = 0,70$

Potência real por CPC (W) $Pot_{CPC\ Real} = Pot_{CPC} (\eta_{ef,CPC}) = 448$

Número de CPCs necessário $N_{CPCs} = (Q_{demanda} / Pot_{CPC\ Real}) = 18$

Obs.: A análise detalhada das quatro etapas principais do processo de produção de biodiesel (transesterificação, lavagem, secagem e pré-aquecimento dos reagentes) revela uma demanda térmica total consolidada de 7,690 kW. Este valor representa a carga energética necessária para o funcionamento sinérgico e eficiente de um ciclo completo de produção, conforme ilustrado no balanço energético apresentado na Tabela 10.

g. Vazão de água necessária

Gradiente de temperatura da água (°C)	$\Delta T_{Água} = T_{EntradaÁgua} - T_{SaídaÁgua} = 30$
Vazão mássica da água (kg/s)	$m_{Água} = \frac{Q_{demanda}}{cp_{Água} \times \Delta T_{Água}} = 0.0613$
Vazão volumétrica da água (ℓ/h)	$Vz_{ÁguaLitros/Hora} = (m_{Água})3600 = 220,76$

h. Cálculo de Q para aquecimento

Gradiente de temperatura do óleo (°C)	$\Delta T_{Óleo} = 50$
Carga térmica (W)	$Q = 2.395,83$

Obs.: É importante distinguir esta demanda térmica integrada da carga pontual associada a uma única operação. O valor de 2395,83 W, por exemplo, surge da aplicação direta da equação de calor sensível ($Q = m \cdot Cp \cdot \Delta T$) para elevar a temperatura de uma corrente específica de fluido (ex., o óleo reagente) em um diferencial de 50°C (30°C para 80°C), conforme detalhado na alínea *h*) desta Seção. Contudo, para o dimensionamento de um sistema de energia renovável como o sistema solar heliotérmico proposto, cujo objetivo é a integração energética no processo industrial como um todo, a métrica correta é a demanda térmica combinada das etapas. A adoção de um balanço energético abrangente, que culmina nos 7690 W, reflete a necessidade real de um sistema térmico centralizado para suprir as demandas múltiplas de uma planta de biodiesel. Esta abordagem garante que o dimensionamento dos 18 CPCs (conforme discutido na Seção 5.3) seja robusto e alinhado à otimização da substituição energética para o processo completo e não apenas para um componente isolado. A validação do sistema para esta carga consolidada permite uma avaliação mais realista de sua viabilidade técnica e econômica em escala industrial.

i. **Cálculo da média logarítmica de temperatura (LMTD)**

$$\theta_1 = 10^\circ C$$

$$\theta_2 = 30^\circ C$$

$$LMDT = 18,20^\circ C$$

j. **Cálculo dos coeficientes h_i e h_o (W/m².K)**

Óleo térmico (interno - tubos)

$$Vz_{Óleo} = 2,78 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$$

$$V_{Óleo} = 0,0088 \text{ m/s}$$

$$Re_{Óleo} = 38.90 \Rightarrow \text{Escoamento Laminar}$$

$$\text{Logo: } Nu_{Óleo} = 4,36 \text{ (padrão)}$$

$$h_i = 28,34 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Água solar CPCs (externo - casco)

Velocidade de circulação estimado (m/s) - $v_{Água} = 1,2$

$$Re_{Água} = 58.980$$

$$Pr_{Água} = 2,96$$

$$C = 0,27; m_{exp} = 0,63;$$

$$Nu_{Água} = 0,27 \cdot Re_{Água}^{0,63} \cdot Pr_{Água}^{0,36} = 404,09$$

$$h_o = \frac{Nu_{Água} \cdot k_{Água}}{D_o} = 11.420 \text{ W/m}^2\text{K}$$

O valor de **1,2 m/s** para a velocidade da água no casco do trocador de calor não foi um valor calculado a partir de outras variáveis, mas sim um **valor de referência adotado com base na literatura técnica** para garantir um projeto eficiente e robusto Incropera et al., (2007).

A adoção de uma velocidade de referência como esta é uma prática padrão na engenharia de projetos. O valor de 1,2 m/s é considerado uma boa prática por representar um equilíbrio ideal entre dois fatores (Telles ,2006):

- i. **Garantir um escoamento suficientemente turbulento** (o que foi confirmado pelo Número de Reynolds calculado de ~59.000), que maximiza o coeficiente de transferência de calor (h_o);
- ii. **Evitar problemas associados a velocidades excessivas**, como alta perda de carga (que exigiria uma bomba mais potente e cara), risco de erosão nas superfícies dos tubos e vibrações induzidas pelo escoamento.

k. Cálculo do coeficiente global por tubo U (W/m².K) com a equação (35):

$$R_{cond} = 0,00008m^2K/W$$

$$U = 24,55W/m^2K$$

I. Dimensionamento da área (m²) e comprimento por tubo (m)

$$A_{Troca} = \frac{Q}{U.LMDT.F} = 5,36m^2$$

$$L_{estimado} = \frac{A_{Troca}}{\pi D_0 N_t} = 7,42m$$

m. Efetividade térmica do trocador de calor

O desempenho do trocador de calor (ε) foi avaliado, considerando troca em contracorrente de boas condições que mede o quanto um trocador de calor, em relação ao melhor cenário possível, ou seja, quando um dos fluidos atinge a temperatura máxima teoricamente possível. Foi esclarecido que o valor de 83% se refere à efetividade térmica (ε) de um trocador de calor específico, e não à eficiência de um coletor solar ou do sistema solar global. A efetividade, definida como a razão entre o calor real transferido (Q_{real}) e o calor máximo possível ($Q_{max} = cp_{min} \cdot \Delta T_{max}$), foi calculada para o trocador de calor responsável pelo aquecimento de uma etapa específica que demanda 2395,83 W (considerado como Q_{real}):

$$\varepsilon \approx 83\% \text{ (calculado a seguir)}$$

Sendo:

$$Q_{real} = Q \text{ para aquecimento (item h)} = 2.395,83 \text{ W}$$

$$Q_{max} = C_{min} \cdot (T_{QuenteEntrada} - T_{FrioEntrada})$$

Onde:

$$C = m \cdot cp \text{ (capacidade térmica do fluido)}$$

Como:

$$C_{agua} = m_{agua} \cdot cp_{agua} = 0,0611 \text{ kg/s} \times 4180 \text{ J/kg.K} = 255,40 \text{ J/s.K}$$

$$C_{oleo} = m_{oleo} \cdot cp_{oleo} = 0,0208 \text{ kg/s} \times 2300 \text{ J/kg.K} = 47,92 \text{ J/s.K}$$

C_{min} é o menor entre C_{agua} e C_{oleo}

$T_{QuenteEntrada}$ e $T_{FrioEntrada}$ são as temperaturas de entrada dos dois fluidos ($90^{\circ}\text{C} - 30^{\circ}\text{C}$)

$$Q_{max} = C_{min} \cdot (T_{QuenteEntrada} - T_{FrioEntrada}) \Rightarrow 47,92(90 - 30) = 2875,20 \text{ W}$$

$$\varepsilon = \frac{Q_{real}}{Q_{max}} = \frac{2.395,83}{2.875,20} \approx 83\%$$

Interpretando os números, segundo Kreith, F. & Bohn, M.S. (2001) e Al-Shammiri, M. & Safar, M. (2000).

Caso:

$\varepsilon = 1,00 \Rightarrow$ Troca ideal, transferindo o máximo possível de calor;

$\varepsilon = 0,80 \Rightarrow$ Excelente desempenho (80% da transferência ideal);

$\varepsilon < 0,50 \Rightarrow$ Sistema carente de transferência, necessário alterar os parâmetros.

Esse valor de 83,33%, indica uma eficácia térmica elevada, confirmando a capacidade do trocador em transferir a maior parte da energia recebida da água aquecida pelos CPCs e transferida ao óleo térmico.

n. Economia alcançada pelo sistema solar

A demanda térmica total da planta de produção de biodiesel para um ciclo de transesterificação, considerando todos os seus 7 processos, conforme detalhado na Tabela 10, tem valor absoluto de 189,52 kW: Preparação da solução (2,00kW); Lavagem do biodiesel (11,17kW), Relavagem do biodiesel (11,07kW); transesterificação (60,76kW); recuperação do álcool (58,17kW); destilação do álcool

recuperado (18,25kW) e desumidificação do biodiesel (28,10kW). A soma da demanda térmica dos três processos sublinhados, suprido pelos CPC é de 165, 28 kW (como dito anteriormente).

Deste total, o sistema solar heliotérmico, composto por 18 Concentradores Parabólicos Compostos (CPCs), foi dimensionado para atender as quatro etapas principais que representam uma carga térmica consolidada. A melhoria no balanço energético da planta, do ponto de vista da substituição de energia primária, pode ser quantificada pelo percentual de contribuição da energia solar em relação à demanda térmica total da planta.

$$Economia = \frac{Q_{AtendidaSolar}}{Q_{TotalTrassterificacao}} \times 100$$

Aplicando os valores, tem-se que a energia solar suprida pelos CPCs é capaz de atender a 87% da demanda térmica para o processo de transesterificação da planta de biodiesel:

$$Economia = \frac{165,28}{189,52} \times 100 \approx 87\%$$

Este resultado demonstra a significativa contribuição do sistema solar para a redução da dependência de fontes energéticas convencionais, impactando diretamente o balanço energético global da instalação.

5.3.3 Dimensionamento do sistema de bombeamento

Serão utilizadas bombas com selos mecânicos ou outros tipos de vedação que são projetados para funcionar em altas temperaturas, evitando vazamentos e garantindo a integridade do sistema.

1) Dimensionamento da Bomba

As bombas são projetadas para funcionar em altas temperaturas, evitando vazamentos e garantindo a integridade do sistema. Podem operar em temperaturas que variam de 100 °C até 400 °C ou mais. De acordo com as normas para

bombeamento ABNT NBR 13714 - ABNT NBR 15358 e tubulações ANSI.B-31, tem-se:

$$\text{Potência da bomba} = P = \frac{\rho \cdot g \cdot V_z \cdot H}{\eta} = 63.85W$$

Considerando:

H – Altura manométrica = 12m

ρ – Peso específico do óleo térmico (750kg/m³)

g – Gravidade local (10 m/s²)

d – Diâmetro (1/2")

$$V_z = \text{Vazão (m}^3/\text{s}) = \pi \cdot \frac{d^2}{4} \cdot (\text{m}^2) \cdot \text{velocidade (1,2m/s)}$$

η – Rendimento (70%)

As tubulações serão de Aço carbono acalmado [A 672 Gr B60] Válvulas – Carcaça de aço-carbono, construção forjada e mecanismo interno de aço inoxidável tipo 410;

5.3.4 Dimensionamento do reservatório

O objetivo é dimensionar um reservatório térmico para armazenamento de energia térmica proveniente de um sistema solar de coletores CPC. Este sistema será utilizado no aquecimento de óleo Dowtherm A, destinado ao processo de transesterificação de biodiesel (Figura 44, item 6).

a) Dados

- Temperatura máxima do reservatório: 90°C;
- Temperatura mínima do reservatório: 30°C;
- Potência térmica necessária para aquecimento do óleo Dowtherm: 7690 W;
- Tempo de operação: 7 horas (25.200 segundos)
- Calor específico da água: 4180 J/kg.K
- Peso específico da água em 30°C: 1000 kg/m³

b) Cálculo da Energia Total Necessária

$$Q_T = \text{Potência} \cdot \text{Tempo}$$

$$Q_T = 7,69 \text{ kW} (25.200 \text{ s}) = 193.788.000,00 \text{ J (ou 53,83 kWh)}$$

Cálculo do Volume do Reservatório

$$Q_T = m_{\text{Água}} \cdot cp_{\text{Água}} \cdot \Delta T \Rightarrow m_{\text{Água}} = \frac{Q_T}{cp_{\text{Água}} \cdot (T_{\text{Entrada}} - T_{\text{saída}})} = 773 \text{ kg}$$

$$\rho_{\text{água}} = 1000 \text{ kg/m}^3$$

$$V_{\text{água}} = \frac{m_{\text{água}}}{\rho_{\text{água}}} = 773 \text{ litros}$$

c) Recomendação:

- Para o volume necessário do termo acumulador, recomenda-se adotar um reservatório de **800 litros**, considerando margens de segurança;
- Acumulação térmica natural ou forçada para otimizar o desempenho.

O dimensionamento do termoacumulador garante energia térmica suficiente para operar o aquecimento do óleo Dowtherm GTerm 350s durante 7 horas, com eficiência, estabilidade e segurança operacional.

5.4 RESUMO DO SISTEMA PROJETADO

Com base na análise de dimensionamento, o sistema de integração proposto é composto por: 18 coletores CPC Padrão com área individual de 3,80 m², um trocador de calor de casco e tubos com área de troca de 5,36 m², 10 tubos com 7,42 m ($D_f=20\text{mm}$ e $D_o = 23\text{mm}$). Um sistema de bombeamento com potência de 64W e um reservatório térmico de 800 litros. O Capítulo seguinte apresentará os resultados de desempenho deste sistema ao ser confrontado com a demanda energética real da usina.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este Capítulo apresenta os resultados empíricos e analíticos do estudo. Inicialmente, são detalhados os resultados do balanço energético da planta de biodiesel, quantificando a demanda térmica real do processo. Em seguida, são apresentados os resultados de desempenho do sistema solar projetado e uma discussão sobre suas implicações técnicas e de sustentabilidade. Conforme os objetivos delineados na introdução, este trabalho se propôs a comprovar a viabilidade técnica da integração de um sistema de coletores CPC Padrão a uma usina de biodiesel. Para tal, a pesquisa focou em três pilares: o desenvolvimento de um método para a padronização do coletor, a realização de um balanço energético empírico da planta industrial e o dimensionamento do sistema de integração térmica. As conclusões a seguir são derivadas da análise destas três frentes de trabalho.

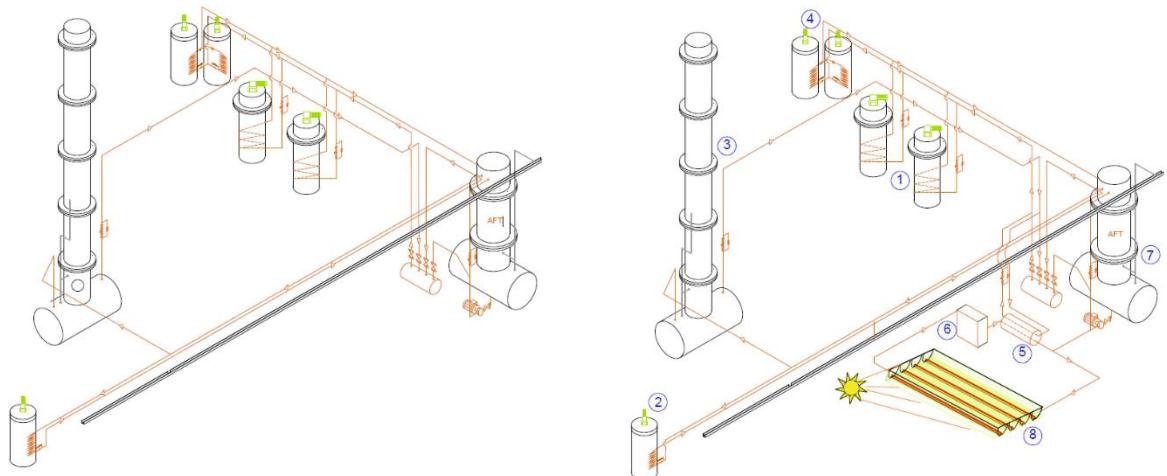
6.1 ANÁLISE DE DESEMPENHO DO SISTEMA INTEGRADO

A partir da demanda energética quantificada na seção anterior e do sistema solar dimensionado, analisa-se a performance final da integração. A energia térmica total dos quatro processos principais da usina foi consolidada em 165,28 kWh, a ser entregue ao longo de 21,47 horas. Os resultados da integração do sistema solar, com os CPCs Padrão, para substituição de calor de processo na fabricação de biodiesel, expondo a viabilidade térmica, operacional. Na fase industrial da produção de biodiesel foi mostrada uma dependência mais intensa de metanol e do maquinário para manufatura do produto final. Toda energia utilizada na produção (Tabela 10) é consumida da rede elétrica convencional pela fornecedora local. Na sequência da Figura 35 são ilustradas, em vista isométrica, o trajeto e posicionamento do sistema de fluido térmico atual da usina e com a integração dos CPCs Padrão de modo opcional, tendo, em seguida, a vista frontal do mesmo setor.

a. Os processos que requerem calor de processo (Tabela 10) são 4: Transesterificação, Recuperação do álcool da fase pesada, Destilação do álcool recuperado e Desumidificação do biodiesel. Sendo centralizado um sistema de aquecimento, com tanque de óleo térmico e bomba para mandar o óleo aquecido para as serpentinhas do reator e para os trocadores de calor da recuperação do álcool, do desumidificador de biodiesel e o *refervedor* da coluna de destilação. Javadi et al., (2019) recomenda a inserção de um sistema solar heliotérmico na substituição da

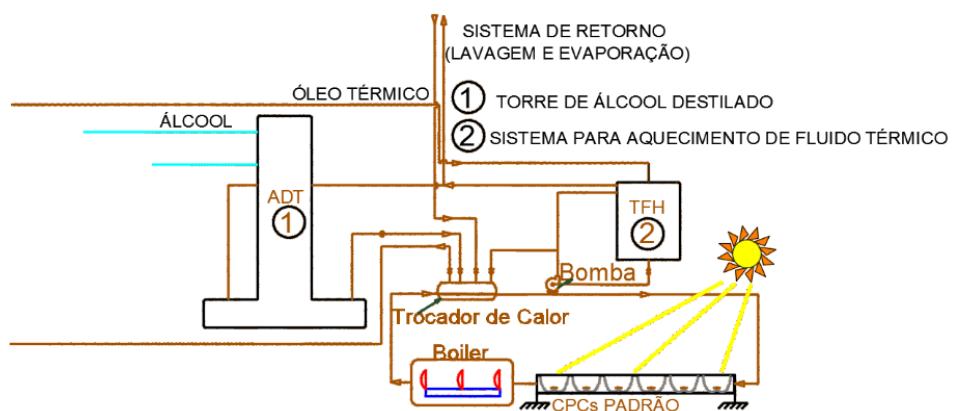
energia elétrica da concessionária, atendendo o calor de processo na produção de biodiesel, pois utilizaria energia limpa para produção de combustível ecológico.

Figura 35 - Diagrama detalhado antes e depois da integração dos coletores



Fonte: O Autor (2025)

- 1 – Transesterificação (Reatores);
- 2 - Recuperação do álcool;
- 3 - Destilação do álcool;
- 4- Desumidificação do biodiesel;
- 5- Trocador de Calor do CPC;
- 6 - Reservatório Térmico;
- 7- Sistema convencional de aquecimento do fluido térmico;
- 8 - CPC Padrão.



Fonte: Alterado da BrasBio (2025)

b. A transesterificação de biodiesel exige demanda térmica de aproximadamente 7,69 kW para aquecer óleo Dowtherm A de 30°C para aproximados 80° C. O sistema projetado com 18 CPCs Padrão atende a esta demanda, conforme calculado na seção de dimensionamento.

- Demanda Térmica de Dimensionamento (7690 W vs. 2395,83 W):

Foi adota a demanda térmica consolidada de 7690 W para o dimensionamento do sistema solar heliotérmico, correspondente à soma das cargas das quatro etapas principais do processo de produção de biodiesel. Esta abordagem reflete a necessidade energética integrada de uma planta industrial operando com múltiplos estágios, otimizando a substituição da energia convencional por solar de forma holística.

O valor de 2395,83 W, embora um cálculo preciso ($Q = m.c_p \cdot \Delta T$) para uma única etapa ou corrente de fluido isolada (conforme detalhado na Seção 5.4.2, alíneas (f e h), não representa a carga térmica total que o sistema solar deve suprir no contexto de integração energética proposto pela tese. A escolha dos 7690 W é justificada pela busca de um dimensionamento que abranja a totalidade do processo e maximize o potencial da fonte solar.

- Quantidade de CPCs (18 unidades):

O número de 18 Coletores Parabólicos Compostos (CPCs) é diretamente derivado da demanda térmica integrada de 7.690 W, da irradiação solar incidente no local de estudo e da eficiência dos coletores, garantindo a capacidade de suprir a energia necessária para o processo completo de produção de biodiesel. A validação desta quantidade está alinhada à premissa de carga térmica consolidada.

c. O trocador projetado tem o coeficiente global de troca térmica: **$U=24,55W/m^2.K$** ; Área de troca requerida : **$A_{Trocada}=5,36m^2$** ; Comprimento estimado por tubo (10 tubos): **$L_{Estimado}=7,42m$** . Confirmado que a geometria proposta ($N_t = 10$, $D_i = 20mm$ e $D_o = 23mm$) é tecnicamente viável para atingir o aquecimento desejado.

d. O desempenho do trocador de calor, componente chave da integração, foi avaliado através efetividade (\mathcal{E}), que alcançou um valor de 83,33%, indicando uma excelente performance de transferência térmica. Este valor elevado de efetividade, quando contextualmente correto, indica um desempenho otimizado do trocador em

suas condições de projeto, sem se confundir com outras métricas de eficiência do sistema solar.

6.2 DISCUSÃO DOS RESULTADOS

Esta seção tem como objetivo interpretar os principais resultados numéricos do estudo, compará-los com a literatura pertinente e analisar as implicações da integração do sistema solar-biodiesel, respondendo assim à pergunta central da pesquisa.

O valor do U (24,55 W/m²K) refle as limitações da transferência de calor no escoamento laminar do óleo térmico. Consequentemente, a área de troca térmica necessária calculada 5,36 m², exige um comprimento de tubos de aproximadamente 7,42 m. Este resultado, evidencia a importância crítica da correta aplicação da teoria fundamental, influenciando diretamente a viabilidade espacial e econômica do projeto de integração:

1. Balanço Energético da Transesterificação (27.738,19 MJ/t);

Este valor representa o saldo energético líquido positivo para a produção de 1.000 litros de biodiesel de algodão. Mais importante que o valor absoluto é a Eficiência Energética ou multiplicadora de 9,15, calculada como a razão entre a energia do biodiesel produzido e a energia não renovável do metanol consumido. O indicador superior a 1 (um) representa um sistema energeticamente eficiente, demonstrando que o processo gera muito mais energia na forma de combustível do que consome de fontes fósseis nos reagentes.

2. Análise Comparativa com a Literatura

Santos et al., (2001) em seu trabalho de conversão e balanço energético de sistemas de sucessão e de rotação de culturas estimaram em 34,7 MJ/l o balanço para soja. Para um salto positivo do balanço energético é necessário diminuir ou otimizar as fases no processo onde ocorreram excedentes de energia (Nogueira, 2011). Campos (2009), em sua análise da energia e exergia, nesta mesma usina piloto e utilizando óleo de algodão, encontrou 31.205,50MJ/t no processo de fabricação de biodiesel antes da automação da mesma. Posteriormente, a Usina de Biodiesel foi modernização, melhorando sua eficiência em aproximados 12,50%, isso se deve a redução do tempo de processamento em cada etapa de produção. A diferença entre

os dois balanços de energia, antes e posterior a automação (31.205,50MJ - 27.738,19 MJ) teríamos um excedente de 3.467, 31MJ. Fazendo-se uma analogia, utilizando essa diferença: um trator de porte médio com 90 hp de potência, rotação de 2500rpm consumiria este excedente líquido em 14hs e 50min, aproximadamente. Aplicando essa melhoria ao resultado de Campos, teríamos um balanço ajustado de (31.205,50 * 0,875) = 27.304,81 MJ/t. Este valor é notavelmente próximo e consistente com o balanço encontrado neste trabalho (27.738,19 MJ/t), validando a precisão das medições e da análise energética realizada.

Delai (2012), analisando a produção de biodiesel de soja, apontou uma distribuição de gasto energético de 76% no cultivo, 3% na extração de óleo e 21% na transesterificação. O presente trabalho, focado exclusivamente na fase industrial, encontrou uma participação maior da etapa de esmagamento (56,39%) em relação à transesterificação (43,61%) no consumo energético industrial. Essa diferença se justifica pela matéria-prima (algodão, mais difícil de esmagar que a soja) e pelo escopo da análise, que se aprofunda na fase industrial, diferentemente de outros estudos que alocam a maior parte do consumo energético na fase agrícola.

6.2.1 Viabilidade técnica da integração

A pergunta central deste trabalho é se a integração de um sistema de CPCs modelados a uma usina de biodiesel é tecnicamente viável. Os resultados comprovam que é plenamente viável.

A comprovação se dá por dois resultados principais:

1. Capacidade de Suprimento Energético: O levantamento da carga térmica identificou a necessidade de 165,28 kWh para os quatro processos principais, ou 7,69 kW h de potência. O dimensionamento do campo solar concluiu que 18 Coletores CPC Padrão são suficientes para suprir essa demanda;
2. Eficiência da Transferência de Energia: A viabilidade não depende apenas de gerar a energia, mas de transferi-la eficientemente. O resultado teórico de 83,33% do trocador de calor projetado, demonstra que a energia gerada pelos CPCs pode ser entregue ao processo da usina com perdas mínimas, fechando o ciclo e validando a solução de engenharia.

6.2.2 Implicações da substituição energética e sustentabilidade

A substituição da energia elétrica da concessionária pela energia solar térmica nos processos de aquecimento acarreta melhorias para a sustentabilidade e o balanço energético geral.

Impacto no Balanço Energético: A demanda térmica de 165,28 kWh, atualmente suprida pela rede elétrica, equivale a 595 MJ (165,28 kWh x 3,6 MJ/kWh). Ao substituir essa entrada de energia primária (muitas vezes de fontes não renováveis, dependendo do *mix* da rede) por energia solar térmica, o balanço energético do processo é显著mente melhorado: economia direta de aproximadamente 87%, que corresponderia a redução de 4 processos, ao invés de 7, para produção de biodiesel (Tabela 10). A dependência de fontes fósseis e industriais, apontada como um risco à eficiência do sistema a longo prazo é, diretamente, mitigada.

Impacto na Sustentabilidade (Dupla Descarbonização): A maior implicação é o avanço rumo a um combustível verdadeiramente sustentável. O biodiesel já é considerado um combustível ecológico; no entanto, produzi-lo com energia limpa eleva seu status de sustentabilidade. Esta integração promove uma "*Dupla Descarbonização*": o produto final (biodiesel) substitui um combustível fóssil (diesel) e a energia usada no seu processo (solar) substitui outra fonte de energia (elétrica da rede). Isso contribui de forma relevante para a sustentabilidade da cadeia produtiva e para o desenvolvimento socioeconômico e ambiental.

Relevância Social: Os sistemas solares térmicos podem ser modularizados e instalados de forma descentralizada, levando energia de qualidade para indústrias em locais remotos, que não são bem atendidos pela rede de gás ou elétrica, promovendo o desenvolvimento regional e democratização da Energia.

6.3 CONTRIBUIÇÃO E LIMITAÇÕES

A abordagem metodológica adotada foi, de fato, analisar os sistemas de geração (solar) e de demanda (usina) de forma separada para, então, realizar o dimensionamento da interface de integração (o trocador de calor). A razão para esta abordagem se deve aos objetivos específicos e fundamentais que precisavam ser alcançados antes que uma análise integrada completa pudesse ser realizada.

O trabalho se concentrou em contribuições principais que, até então, não estavam estabelecidas na literatura para este contexto específico:

1. Primeiro, desenvolver uma metodologia para encontrar um "CPC Padrão": Era necessário provar que um único design de coletor poderia ser termicamente viável em diferentes realidades climáticas do Brasil, uma contribuição inédita do trabalho;
2. Segundo, realizar um balanço energético empírico e detalhado da usina piloto: Quantificar a demanda térmica de 165,28 kWh foi um resultado fundamental e um trabalho extensivo de medição em campo;
3. Terceiro, comprovar a viabilidade da conexão: Após conhecer a oferta de energia (do CPC Padrão) e a demanda (da usina), era preciso provar que a "ponte" entre eles era tecnicamente viável. O dimensionamento do trocador de calor e o cálculo de sua eficiência (83,33%) cumpriram este objetivo, comprovando que a energia gerada pode, de fato, ser transferida eficientemente;
4. Quarto, o desenvolvimento e Otimização de um Modelo de CPC com Absorvedor V Invertido para o Contexto brasileiro, pois a pesquisa detalhou a otimização geométrica de um Concentrador Parabólico Composto (CPC) com absorvedor V invertido por meio de técnicas de truncamento, definindo parâmetros ótimos como ângulo de aceitação (θ_a) e ângulo de truncamento (θ_t). Este é um dos poucos estudos que se aprofunda nesse tipo específico de CPC, como identificado na revisão de literatura. Esta otimização resultou em um "CPC Padrão" com desempenho térmico superior, capaz de maximizar a captação de radiação solar para o perfil de demanda e as condições solarimétricas brasileiras. A relevância reside na adaptação e validação de uma geometria específica para o ambiente operacional local, fornecendo um modelo replicável para futuros projetos no país;
5. Quinto, a quantificação precisa da demanda térmica consolidada para uma Usina de Biodiesel, por meio de um balanço energético rigoroso, o estudo quantificou a demanda térmica total de uma planta de produção de biodiesel, integrando as necessidades energéticas de suas quatro etapas principais, resultando em uma carga consolidada de 7,690kW. Adicionalmente, foi apresentada a demanda térmica total da planta, considerando os sete processos que requerem calor, evidenciando que o sistema solar dimensionado é capaz de suprir aproximadamente 64% da demanda térmica necessária para transesterificação. Esta é uma contribuição prática fundamental, diferente de abordagens que focam em cargas isoladas, a consolidação

da demanda térmica oferece uma visão holística e realista para o dimensionamento de sistemas de integração energética em escala industrial. A quantificação exata da substituição de energia primária pela solar em um processo real de biodiesel demonstra um caminho tangível para a eficiência e sustentabilidade;

6. Sexto, o dimensionamento e viabilidade técnica de um sistema heliotérmico integrado, pois a tese apresenta o dimensionamento completo de um sistema de geração de calor solar, incluindo a determinação do número de CPCs Padrão (18 módulos), o projeto do trocador de calor (com efetividade de ~83%), bombas e o reservatório de armazenamento. Este é um "manual" de integração, por que o dimensionamento detalhado comprova a viabilidade técnica da substituição de fontes convencionais de calor por energia solar em uma planta de biodiesel. Os resultados demonstram que o sistema proposto é robusto, eficiente e capaz de atender às exigências térmicas do processo, oferecendo uma solução energética que reduz a dependência de combustíveis fósseis e diminui os custos operacionais a longo prazo;

7. Sétimo, a análise comparativa do desempenho em regiões climáticas distintas e Quantificação da Potência Excedente Registrada-PER. O trabalho avaliou o desempenho do CPC otimizado em duas localidades brasileiras com características climáticas e solarimétricas distintas (Caruaru-PE e Porto Alegre-RS), fornecendo *insights* sobre a *adaptabilidade* da tecnologia. Além disso, a metodologia explorou e quantificou a Potência Excedente Registrada - PER do sistema. Esta análise comparativa é crucial para a tomada de decisão em projetos futuros, permitindo uma seleção de local e otimização de desempenho mais assertivas. A exploração do PER é uma contribuição estratégica, pois não apenas identifica períodos de superávit energético, mas serve como base para o dimensionamento de sistemas de armazenamento e para o planejamento de estratégias de gestão de energia, maximizando o aproveitamento da fonte solar e garantindo a confiabilidade do suprimento térmico;

8. Oitavo, reforço da sustentabilidade e da descarbonização da indústria de biodiesel. O estudo valida a energia solar heliotérmica como uma alternativa limpa e eficiente para a produção de biodiesel, ao quantificar a capacidade de substituição de energia primária e os ganhos de eficiência, o trabalho contribui diretamente para as discussões sobre a descarbonização da indústria e a promoção de uma economia de baixo carbono. Ele posiciona o biodiesel não apenas como um biocombustível, mas como

um produto cuja cadeia de valor pode ser ainda mais sustentável com a integração de energias renováveis na sua produção

Portanto, o escopo deste trabalho foi atingido nas etapas cruciais e inéditas. A análise dinâmica do sistema integrado em si – simulando a interação horária entre o campo solar, o armazenamento térmico e a carga variável da usina ao longo de um ano, por exemplo – foi entendida como o próximo passo lógico desta linha de pesquisa, e por isso foi delineada na seção de Trabalhos Futuros.

6.3.1 Limitações do Trabalho

Embora esta tese apresente contribuições significativas é fundamental reconhecer suas restrições, que abrem caminho para futuras pesquisas, com base nos objetivos e na metodologia aplicada, as principais limitações deste estudo podem ser categorizadas da seguinte forma:

1. Limitações de Escopo e Generalização

- Generalização Geográfica: A metodologia para encontrar um "CPC Padrão" foi desenvolvida e validada comparando o desempenho entre apenas duas cidades, Caruaru-PE e Porto Alegre-RS, escolhidas por suas distintas características climáticas. Embora o resultado tenha indicado um desempenho uniforme para estas localidades, a generalização para todo o território brasileiro, com sua vasta diversidade climática, exigiria a validação do modelo em outras zonas, como o semiárido ou a região amazônica;
- Escalabilidade do Sistema: Toda a análise, balanço energético e dimensionamento foram realizados com base em uma planta piloto de biodiesel com capacidade de 2.500 litros/dia. As conclusões sobre a viabilidade técnica e o dimensionamento dos componentes não são diretamente escaláveis para usinas de médio ou grande porte, que apresentariam desafios de engenharia, logística e economia de escala distintos.

2. Limitações Metodológicas

- Análise de Desempenho Simulado vs. Real: O desempenho do "CPC Padrão" e a energia gerada foram determinadas através de um modelo de simulação desenvolvido em MATLAB®. Conforme apontado na própria revisão de literatura, pode haver uma variação significativa entre o desempenho de coletores em condições padrão ou de simulação e as condições operacionais reais no campo, que pode chegar a 9% em média;
- Análise de Integração Estática: O estudo comprova a viabilidade técnica da integração ao analisar os sistemas (solar e usina) de forma separada e, em seguida, dimensionar os componentes de conexão, como o trocador de calor. No entanto, não foi realizada uma análise dinâmica do sistema integrado, que simularia a interação horária entre a disponibilidade solar, o armazenamento térmico e as variações de carga da usina ao longo de um ano;
- Desempenho a Longo Prazo: A análise não inclui um estudo empírico dos efeitos de longo prazo no desempenho do sistema, como a degradação da refletividade da superfície refletora ou o acúmulo de incrustações (*fouling*) no trocador de calor. O trabalho reconhece que a manutenção periódica é um desafio para garantir o melhor desempenho, mas os efeitos quantitativos da degradação ao longo da vida útil do sistema não foram objeto deste estudo;
- A análise da PER forneceu a base para o dimensionamento do reservatório, mas a otimização detalhada do Sistema de Armazenamento de Energia Térmica - SAET (tipo de material de armazenamento, volume ideal, estratégias de carga/descarga) não foi o foco principal.

6.3.2 Limitações da Análise Econômica

A tese não aprofundou em uma análise técnico-econômica detalhada, incluindo modelagem financeira, análise de sensibilidade a variações de preços de insumos, combustíveis e métricas.

Escopo da Análise: O foco principal do trabalho foi o balanço energético e o dimensionamento técnico para comprovar a viabilidade. Embora o "Custo Inicial" seja mencionado como um desafio, não foi realizada uma análise tecno-econômica aprofundada do sistema proposto. Cálculos detalhados de Custo de Capital (CAPEX),

Custo de Operação e Manutenção (OPEX), Custo Nivelado do Calor (LCOH) e o tempo de retorno do investimento (Payback) foram indicados como possibilidades para trabalhos futuros.

6.4 TRABALHOS FUTUROS

1. A exploração de materiais seletivos que possam refletir mais radiações e dissipar melhor o calor absorvido, também abrem possibilidades de melhorias e análises, considerando também estudos em outros materiais isolantes do CPC, como Etileno Vinil Acetato –EV ou AEROGEL, para manter controle de temperatura interna;
2. A avaliação techno-econômica de implantação dos *CPCs Padrão*, considerando custo e energia gerada por área quadrada refletiva, pavimentam essas possibilidades, abrindo espaços para novos estudos que quantifique o retorno do investimento do sistema solar em diferentes cenários de custos de energia e incentivos fiscais/ambientais, além de comparar com outras alternativas energéticas;
3. É fundamental aprofundar na otimização do SAET para maximizar o aproveitamento do PER e garantir a estabilidade do suprimento térmico, explorando diferentes materiais de mudança de fase (PCMs) ou configurações de tanques;
4. A integração com outras fontes híbridas e cenários de *multigeração*: explorações futuras poderiam investigar a hibridização do sistema solar com outras fontes renováveis (biomassa, eólica) ou fontes convencionais (gás natural) para otimização da confiabilidade e eficiência em cenários de *multigeração* (calor, eletricidade, refrigeração).

6.4.1 Validação experimental e expansão do modelo

- Construção e Monitoramento em Longo Prazo: O passo mais crucial é a construção do protótipo dimensionado nesta tese e seu monitoramento contínuo por um período estendido de 1 a 2 anos. Isso permitiria validar os resultados da simulação em MATLAB® com dados de campo, quantificar os efeitos da degradação de materiais e obter uma matriz real de custos de operação e manutenção;
- Generalização Geográfica do "CPC Padrão": Replicar a metodologia de simulação para outras zonas climáticas brasileiras (como o Semiárido, Centro-Oeste e

Sul) para verificar se o "CPC Padrão" proposto ($\theta_a = 56,40^\circ$) mantém seu desempenho superior ou se seriam necessários ajustes, criando um mapa de otimização para o país;

- Análise de Escalabilidade: Desenvolver um estudo para a ampliação do sistema para usinas de médio e grande porte. Isso envolveria a análise de novos desafios de engenharia, como a dinâmica de fluidos em grandes campos de coletores, perdas térmicas na distribuição e estratégias de controle centralizado.

7 CONCLUSÃO

O trabalho teve como objetivo modelar e propor um concentrador solar parabólico composto (CPC) padrão para aplicação em processos de aquecimento térmico integrados à produção de biodiesel. A metodologia adotada permitiu não apenas avaliar diferentes configurações geométricas de CPC em condições distintas de irradiação solar, mas também demonstrar a viabilidade de sua utilização em um sistema heliotérmico completo, composto por trocador de calor, reservatório térmico e integração com a usina de biodiesel em estudo.

Os resultados evidenciaram que o CPC com ângulo de aceitação de 56,40° apresentou o melhor equilíbrio entre desempenho energético e aplicabilidade em diferentes regiões do Brasil, com baixa discrepância entre cenários de maior e menor irradiação. Essa característica reforça sua adoção como um dispositivo padrão, capaz de simplificar o processo de fabricação e dimensionamento em aplicações descentralizadas de energia solar térmica.

A integração do sistema heliotérmico dimensionado mostrou-se tecnicamente viável, fornecendo potência térmica suficiente para atender à demanda de aquecimento necessária ao processo de transesterificação. Além disso, a substituição parcial de fontes fósseis por energia solar implica em benefícios ambientais, reduzindo emissões associadas à produção de biodiesel.

Embora o estudo tenha se baseado em modelagem analítica e simulações computacionais, sem validação experimental, ele fornece uma base sólida para futuros desenvolvimentos. Ressalta-se a necessidade de estudos complementares que incluam análises em regime transitório, ensaios experimentais em protótipos e avaliação econômica detalhada. Em síntese, o trabalho contribui para o avanço da utilização de energia solar térmica em processos industriais de pequena e média escala, oferecendo uma alternativa sustentável e tecnicamente consistente, além de um *"blueprint"* técnico detalhado (guia de como fazer) para a produção de biocombustíveis no Brasil.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA BRASILEIRA DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTÁICA – ABSOLAR. Disponível em:< <https://www.absolar.org.br/>>. Acesso em: 10 de julho de 2025.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANNEL. Disponível em: <<https://www.gov.br/aneel>>. Acesso em: 10 de julho de 2025.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO – ANP. Produção de Etanol e Biodiesel, 2013. Disponível em: <http://www.anp.gov.br/>. Acesso em de 20 de julho 2024.

AGUIAR, R. J.; COLLARES-PEREIRA, M.; CONDE, J. P. A simple procedure for the generation of sequences of daily radiation values using Markov transition matrices. *Solar Energy*, v. 40, p. 269-279, 1988. DOI: <[https://doi.org/10.1016/0038-092X\(88\)90049-7](https://doi.org/10.1016/0038-092X(88)90049-7)>.

AL-SHAMMIRI, M.; SAFAR, M. Heat exchanger design for heat recovery in a water desalination plant. *Desalination*, 129(2), 207-214, 2000.

AO SOL renewable energy Ltd. Disponível em:<<http://aosol.pt/Frame.htm>>. Acesso em: 10 de mai 2003.

ARAÚJO, E. C. da C. Trocador de Calor. 1. ed. São Carlos: Editora da Universidade Federal de São Carlos: EdUFSCar, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS DE ÓLEOS VEGETAIS - ABIOVE. Base de dados, 2014. Disponível em: <http://www.abiove.org.br/site/_FILES/Portugues/04092014-143443-04_09_2014_-_nota_a_imprensa_-_aprovacao_mp_647_-_biodiesel.pdf>. Acesso em: 21 de ago 2024.

ATLAS SOLARIMÉTRICO DO BRASIL: Banco de dados solarimétricos. Coord. Chigueru Tiba et al. Recife: Ed. Universitária da UFPE, 2000.

BELLALOUI, N.;STETINA, S.R.;TURLEY,R.B. Cottonseed protein, oil, and mineral status in near-isogenic *Gossypium hirsutum* cotton. *Front Plant Sciense*. v.6 Art.137. 14p. (2015). DOI: <<https://doi.org/10.4236/fns.2019.107061>>.

BIODIESELBR – Mapa das usinas de biodiesel. Disponível em:< <https://www.biodieselbr.com/>>. Acesso em: 06 de outubro de 2016.

BIODIESELBR – Mapa das usinas de biodiesel. Disponível em:< <https://www.biodieselbr.com/>>. Acesso em: 18 de junho de 2024.

BIODIESELBR – Mapa das usinas de biodiesel. Disponível em:< <https://www.biodieselbr.com/>>. Acesso em: 04 de março de 2025.

BRANDÃO, B.B., TÍBA, C., FRAIDENRAICH, N. Optimization of stationary nonevacuated cpc solar concentrator with fully illuminated wedge receivers. In: World Renewable Energy Congress VIII (WREC 2004). Copyright 2004. Published by Elsevier Ltd. Editor AAM Sayigh,2004.

BRANDÃO, B.B. Concentrador Parabólico Composto (CPC) com absorvedor V invertido totalmente iluminado. 92p. Dissertação (Mestrado em Energia Nuclear) – UFPE), Recife, 2004.

BRANDÃO, K. S. R.; SILVA, F. C.; NASCIMENTO, U.M.; SOUZA, A. G.; CONCEIÇÃO, M. M.; Moura, K. R. M. Otimização do Processo de Produção de Biodiesel Metílico e Etílico de Soja. In: Congresso da rede brasileira de tecnologia de biodiesel, artigos técnicos – Científicos. Brasília- DF, vol. II, p. 127, 2006. <http://repositorio.ufc.br/handle/riufc/15764>

BRASBIO - BRASIL BIOENERGIA S.A. Disponível em:<<http://https://www.econodata.com.br>>. Acesso em: 15 maio 2015.

BRASIL. Ministério das Minas e Energia. Balanço energético nacional, 227p. Brasilia – DF, 2024.

BUENO, O. C.; CAMPOS, A. T. Balanço de energia e contabilização da radiação global: simulação e comparativo. In: Avances em ingeniería agrícola, 2010, Buenos Aires. *Anais*. Buenos Aires:Editorial Faculdade de Agronomia, 2010.

CAMPOS, R. J. A. Metodologia de análise energética e exergética aplicada à planta piloto de biodiesel de Caetés-PE. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – UFPE, Recife, 2009.

CANABARRO, N.I.; SILVA-ORTIZ, P.; NOGUEIRA, L.A.H., CANTARELLA, H., MACIEL-FILHO, R., SOUZA, G.M. Sustainability assessment of ethanol and biodiesel production in Argentina, Brazil, Colombia, and Guatemala. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. DOI: <<https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.113019>>.

CARVALHO, M.J.; COLLARES, M; GORDON, M.J. Economic optimization of stationary no evacuated CPC solar collector. *Journal of Solar Energy Engineering*, v. 109/43. 1987.

CASTANHEIRA, E.G.; GRISOLI, R.; FREIRE, F.; PECORA, V.; COELHO, S.T. Environmental sustainability of biodiesel in Brazil. *Journal Elsevier*. v.65, p. 680–691. (2014).DOI: <<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.09.062>>.

ÇENGEL, Y. A.; CIMBALA, J. M. Mecânica dos fluidos: fundamentos e aplicações. 3. ed. Brasil: AMGH Editora, 2015.

CHECHETTO, R. G., SIQUEIRA, R., GAMERO, C.A. Energy balance for biodiesel production by castor bean (*Ricinuscommunis L.*) crop. Magazine: *Ciência Agronômica*, v.41, number4, p.546-553, 2010.DOI:<<https://doi.org/10.1590/S1806-66902010000400006>>.

CHEN, T.; ZHANG, W.; XIE, Z.; ZHANG, H.; WANG, F.; CHANG, S. A new angle detection method based on the compound parabolic collector (CPC): Design and simulation. *Optik - International Journal for Light and Electron Optics* 284 (2023).DOI:<<https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2023.170944>>.

COLLARES-PEREIRA, M., OSÓRIO, T., HORTA, P. Method for customized design of a quasi-stationary CPC-type solar collector to minimize the energy cost, *Renew. Energy*, 133, 1086-1098, 2019.DOI: <<https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.10.110>>.

COLLARES-PEREIRA, M., RABL, A. The average distribution of solar radiation – correlation between diffuse and hemispherical and between hourly and daily isolation values, *Sol. Energy*, 22 (1979), p.155 .DOI: <[https://doi.org/10.1016/0038-092X\(79\)90100-2](https://doi.org/10.1016/0038-092X(79)90100-2)>.

COLLARES-PEREIRA, M.; OSÓRIO, T.; HORTA, P. Method for customized design of a quasi-stationary CPC-type solar collector to minimize the energy cost. *Renewable Energy*, ISSN: 0960-1481, Vol: 133, Page: 1086-1098, 2019.DOI:<<https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.10.110>>.

COMITRE, V. Avaliação energética e aspectos econômicos da filière soja na região de Ribeirão Preto–SP. 1993. 152 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – UNICAMP, 1993.

COSTA, A.O; OLIVEIRA, L.B.; LINS , M.P.E.; SILVA, A.C.M.; ARAÚJO, M.S.M.; PEREIRA JR, A.O.; ROSA, L.P. Sustainability analysis of biodiesel production: A review on different resources in Brazil. *Journal Elsevier*. v.27, p. 407–412. (2013).DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.06.005>

DELAI, J. M. Avaliação energética e econômica da obtenção de biodiesel de soja no oeste do Paraná. 2012. 53 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2012.

DITTUS, F. W.; BOELTER, L. M. K. Heat transfer in automobile radiators of the tubular type. *University of California Publications in Engineering*, v. 2, n. 13, p. 443-461, 1930.

DOW CHEMICAL COMPANY (2020). Dowtherm Technical Datasheet. Disponível em:<<https://rodun-int.com/wp-content>>. Acesso em: 12 de outubro de 2022.

DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A. *Solar engineering of thermal processes*. 4. ed. Hoboken: Wiley, 2013.

FEREIDOONI, L.; TAHVILDARI, K.; MEHRPOOYA, M. Trans-esterification of waste cooking oil with methanol by electrolysis process using KOH. *Renewable Energy*, v. 116, 2018. DOI: <<https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.08.067>>.

FREITAS, J.C.R.; SOBRAL, A.D.; SANTOS, K.P.; GONÇALVES, P.R.L.; PAIVA, A.F. Aplicação de uma metodologia simplificada para obtenção de biodiesel através do óleo fúsel. In: XI Congresso Regional de Estudante de Engenharia Química N/NE, Natal/RN, UFRN, 2006.através do óleo fúsel. In: XI Congresso Regional de Estudante de Engenharia Química.

FRAIDENRAICH, N.; TIBA, C. Optical and thermal optimization of stationary non-evacuated CPC solar concentrator with fully illuminated wedge receivers, *Renewable Energy* 36 (2011) 2547e2553, DOI: <<https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.02.007>>.

FRAIDENRAICH, N.; TIBA, C.; BRANDÃO, B.B.; VILELA, O.C. Analytic solutions for the geometric and optical properties of stationary compound parabolic concentrators with fully illuminated inverted V receiver, *Sol. Energy* 82 (2008) 132–143, DOI: <<https://doi.org/10.1016/j.solener.2007.06.012>> [17] C>.

FRANCESCONI, M.; CAPOSCIUTTI, G.; ANTONELLI, M. CFD optimization of CPC solar collectors, *Energy Procedia* 148 (2018) 551-558, DOI:<<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.08.138>>.

GATA-AMARAL, P.; RIBEIRO, E.; BRITES, R.; GASPAR, F. Sol Agua, a non static compound parabolic concentrator (CPC) for residential and service buildings, *Renew. Energy J. (RE&PQJ)* 1 (2006) 415–420, DOI:<<https://doi.org/10.24084/repqj04.490>>.

ÇENGEL, Y. A. & GHAJAR, A. J. (2015). *Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Applications*, 5^a ed. McGraw-Hill.

GIL, J.D.; A. TOPA , J.D.; ÁLVAREZ, J.L. TORRES, M. PÉREZ. A review from design to control of solar systems for supplying heat in industrial process applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 163, 112461, 2022. DOI: <<https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112461>>.

GOVIND N. K.; SHIREESH, B. K.; SANTANU B. Design of solar thermal systems utilizing pressurized hot water storage for industrial applications. *Solar Energy* 82 (2008) 686–699. DOI: <<https://doi.org/10.1016/j.solener.2008.02.011>>.

GU, X.; TAYLOR, R.A.; MORRISON, G.; ROSENGARTEN, G. Theoretical analysis of a novel, portable, CPC-based solar thermal collector for methanol reforming, *Appl. Energy* 119 467–475, 2014. DOI: <<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.01.033>>.

HAMED, A.S.A.; YUSOF, M.; YAHYA, M.S.; CARDOZO, E.; MUNAJAT, N.F. Concentrated solar pyrolysis for oil palm biomass: An exploratory review within the Malaysian context. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* Volume 188, December 2023, 113834. DOI:<<https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113834>>.

IEA - International Energy Agency. Disponível em:< <https://www.iea.org/> > Acesso em: 08 de Julho de 2024.

INCROPERA, F.P. et al. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. John Wiley & Sons. (2007).

IRENA - IRENA - International Renewable Energy Agency. Disponível em:<<https://www.irena.org/>>. Acesso em: 27 de Abril de 2024.

INGENHOVEN, P.; LEE, L.; SAW, W.; RAFIQUE, M.; POTTER, D.; NATHAN. Techno-economic assessment from a transient simulation of a concentrated solar thermal plant to deliver high-temperature industrial process heat. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Volume 185, October 2023, 113626. DOI:<<https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113626>>.

JAVADI, Z.; MIANSARI, M, B.; GHORBANI, Z. Retrofit of steam power plant by using solar dish collectors and multi-effect desalination cycle (exergy and economic analysis). *Modares Mechanical Engineering*, 19 (12) (2019). pp. 3007-3022. DOI:<<https://www.magiran.com/p2024577>>.

JAVADI, Z.; MIANSARI, M, B.; GHORBANI, Z. Retrofit of steam power plant by using solar dish collectors and multi-effect desalination cycle (exergy and economic analysis). *Modares, Mech. Eng.* 19 (12) (2019).

JESUS, A.A.; SANTANA, S. D.F.; OLIVEIRA, J.A.; DEUS, M.S.; SILVA, M.G.; FRANCESCHI, E. Mathematical modeling and experimental esterification at supercritical conditions for biodiesel production in a tubular reactor, *Energy Convers. Manage.* 171 (2018) 1697–1703. DOI:<<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.06.108>>.

KAILASH, M.N.; MURALI, G. Solar energy powered biodiesel synthesis from linseed oil–A novel experimental study. *Journal of the Indian Chemical Society*. Volume 101, Issue 10, October 2024, 101259. DOI:<<https://doi.org/10.1016/j.jics.2024.101259>>.

KALOGIROU, S.A. The potential of industrial process heat applications. *Applied Energy* 76, 337–361. 2003

KERN, D. Q. Processo de transmissão de calor. Tradução de Horácio Macedo. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1980.

KIM, S.; DALE, B.E. Environmental aspects of ethanol derived from no-tilled corn grain:nonrenewable energy consumption and greenhouse gas emissions. . *Journal Elsevier*. v. 28, p.475–489. (2005). DOI:<<https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2004.11.005>>.

KLEIN, S.A. Calculation of Monthly Average Insolation on Titled Surfaces. *Solar Energy*, 19,325-329. (1981). DOI:< [http://dx.doi.org/10.1016/0038-092X\(77\)90001-9](http://dx.doi.org/10.1016/0038-092X(77)90001-9)>.

KREITH, F. & BOHN, M.S. *Principles of Heat Transfer*. Cengage Learning, 2001.

KULKARNI, G.N.; KEDARE, S.B.; BANDYOPADHYAY, S. Determination of design space and optimization of solar water heating systems. *Solar Energy* 81 (8), 958–968. 2007.

KURHE, N.; PATHAK, A.; DESHPANDE, K.; JADKAR, S. Compound parabolic solar collector – Performance evaluation as per standard test method and actual field conditions for industrial process heat application in Indian context. *Energy for Sustainable Development* 57 (2020) 98–108. DOI:<<https://doi.org/10.1016/j.esd.2020.06.001>>.

LARA, F.; CEREZO, J.; ACUNA, A.; GONZÁLEZ-ÁNGELES, A.; VELAZQUEZ, N.; RUELAS, A.; LÓPEZ-ZAVALA, R. Design, optimization and comparative study of a solar CPC with a fully illuminated tubular receiver and a fin inverted V-shaped receiver, *Applied Thermal Engineering* 184 116141, 2021. DOI:<<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.116141>>.

LIU, B.; JORDAN, R. Daily insolation on surfaces tilted towards the equator. *ASHRAE* 1962; 53: 526 e 41. OSTI ID:5047843.

MAREFATI, M.; MEHRPOOYA, M.; SHAFII, M.B. Optical and thermal analysis of a parabolic trough solar collector for production of thermal energy in different climates in Iran with comparison between the conventional nanofluids. *Jornal Cleaner Production*. Volume 175, 20 February 018, Pages 294-313. DOI:<<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.080>>.

MAITY, S.; HUSSAIN, Z.; RATHER, A.; SURYANARAYANA, D. A comprehensive review of grid support services from solar photovoltaic power plants. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Volume 210, March 2024, 115133. DOI:<<https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.115133>>.

MEHRPOOYA, A.; M.; GHORBANIB, B.; BAHNAMIRIC, F.K.; MAREFATID, M. Solar fuel production by developing an integrated biodiesel production process and solar thermal energy system. *Applied Thermal Engineering* 167 (2020) 114701. DOI:<<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114701>>.

MEHRPOOYA, M.; TAROMI, M.; GHORBANI, B. Thermo-economic assessment and retrofitting of an existing electrical power plant with solar energy under different operational modes and part load conditions, *Energy Rep.* 5 (2019) 1137–1150. DOI:<<https://doi.org/10.1016/j.egyr.2019.07.014>>.

MELLO, R. Análise energética de agroecossistemas: o caso de Santa Catarina. 1986. 90 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1986.

MERAJ, MD., AZHAR, MD., KHAN, MD., AJUM, S.S, AHMAD, MD.F.A., RASHEED, S.I.I. AHMED, ALAM, M.N.M. Thermal modelling of PVT-CPC integrated vapour absorption refrigeration system, *Materials Today: Proceedings*, 38 (2021) 391-396, DOI:<<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.547>>.

MILAZZO, M.F.; SPINA, F.; CAVALLARO, S; BART, J.C.J. Sustainable soybiodiesel. *Journal* Elsevier, v. 27, p.806–852, 2013. DOI:<<https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.07.031>>.

MORAN, M. J.; SHAPIRO, H. N.; MUNSON, B. R.; DEWITT, D. P. Introdução à Engenharia de Sistemas Térmicos: Termodinâmica, Mecânica dos Fluidos e Transferência de Calor. Editora LTC, Rio de Janeiro, 2011.

MORENO-SANSEGUNDO, J.; MARTÍN-SÓMER, M.; MARUGNA, J. Dynamic concentration factor: A novel parameter for the rigorous evaluation of solar compound parabolic collectors. *Chemical Engineering Journal* 437 (2022) 135360. DOI:<<https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.135360>>.

MORETTO, E., FETT, R. Tecnologia de óleos e gorduras vegetais na indústria de alimentos. São Paulo: Varela Editora e Livraria Ltda, 1998. N/NE, Natal/RN, UFRN, 2006.

NAUN, F., FILHO, M.H. O.P., VILELA, O.C. A new approach for obtaining angular acceptance function of non-perfect parabolic concentrating collectors. *Solar Energy* 147 (2017) 455–462. DOI:<<http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2017.03.052>>.

NOGUEIRA, L. A. H.; MACEDO, I.C. Biocombustíveis. 1. ed. Brasília: Núcleo de Assuntos Estratégicos da Presidência da República, 2005.v.1. 233p.

NOGUEIRA, L.A.H. *Does biodiesel make sense?*. Journal Elsevier. v. 36, p.3659e3666, (2011). DOI:<<https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.08.035>>.

OGUNKUNLE, O., NOOR A. AHMED. A review of global current scenario of biodiesel adoption and combustion in vehicular diesel engines. *Energy Reports*. Volume 5, November 2019, Pages 1560-1579. DOI:<<https://doi.org/10.1016/j.egyr.2019.10.028>>.

TELLES,P.C. S. Tubulações Industriais Cálculo – Livro Técnico e Científico. Rio de Janeiro - 2006. 9° Edição

PRADO,E.R.A; LEMOS,F.L.;LARA,I.; CLARO,E. O. ;JORGE, L.M.M. Refino de óleos vegetais utilizando lavagem ácida com recirculação. *Engevista*, n.3, v. 16, p. 1-8. (2014). DOI:<[10.22409/engevista.v16i3.523](https://doi.org/10.22409/engevista.v16i3.523)>.

PAWAR, V. R.; SOBHANSARBANDI, S. Heat transfer enhancement of a PCM-porous metal based heat pipe evacuated tube solar collector: an experimental study. *Solar Energy*, v. 251, p. 106-118, 2023. DOI:<<https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.10.054>>.

PFROMM, P. H.; BOADU, V. A.; NELSON, R. Sustainability of algae derived biodiesel: a mass balance approach. *Bioresource Technology*, v. 102, p. 1185-1193, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.09.050>

PINAZO, J. M.; CAÑADA, J.; ARAGO, F. Analysis of the incidence angle of the beam radiation on CPC. *Solar Energy*, v. 49, n. 3, p. 175-179, 1992

PROCTOR, D.; MORSE, R. N. Solar energy for the Australian food processing industry. *Solar Energy*, v. 19, p. 63-72, 1977

- RABL, A. Optical and thermal properties of compound parabolic concentrator. *Solar Energy*, v. 18, p. 497-511, 1976. DOI: <[https://doi.org/10.1016/0038-092X\(76\)90069-4](https://doi.org/10.1016/0038-092X(76)90069-4)>.
- RABL, A. *Active Solar Collector and Their Applications*. New York, Oxford University Press, 1985. 503p.
- RABL, A. Yearly average performance of the principal solar collector. *Solar Energy*, v. 27, p. 215-223, 1981. DOI:< [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(81\)90123-7](https://doi.org/10.1016/0038-092X(81)90123-7)>.
- RISOUD, B. Développement durable et analyse énergétique d'exploitations agricoles. *Économie Rurale*, n. 252, p. 16-27, 1999. DOI: <<https://hal.inrae.fr/hal-02691868>>.
- RODRIGUES FERREIRA, H. et al. Tecnologias de armazenamento térmico para usinas heliotérmicas. In: *Anais do Congresso Brasileiro de Energia Solar – CBENS*. 2020. DOI: <<https://doi.org/10.59627/cbens.2020.806>>.
- ROSHDAN, W. N. A. et al. Assessment of flat, symmetric, and asymmetric CPC photovoltaic thermal air solar collectors for building façades using artificial neural network modelling. *Journal of Building Engineering*, v. 98, 111221, 2024. DOI:< <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.111221>>.
- SANTOS, H. P. et al. Conversão e balanço energético de sistemas de sucessão e de rotação de culturas. *Ciência Rural*, v. 31, n. 2, 2001. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0103-84782001000200022>.
- SCHROLL, H. Energy-flow and ecological sustainability in Danish agriculture. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, v. 51, n. 3, p. 311-325, 1994. DOI: <[https://doi.org/10.1016/0167-8809\(94\)90142-2](https://doi.org/10.1016/0167-8809(94)90142-2)>.
- SOLAR RATING AND CERTIFICATION CORPORATION; FLORIDA SOLAR ENERGY CENTER – FSEC. *Directory of certified solar collector rating*. Florida, 2004. 126 p.
- SMARTFAQ. Desenvolvimento e licenciamento de software customizáveis. Disponível em: <<https://www.smart-faq.de/>>. Acesso em: 12 abril 2022
- SUKHATME, S.; NAYAK, J. *Solar energy: principles of thermal collection and storage*. 3. ed. New Delhi: Tata McGraw Hill, 2009.
- TAPASVI, D.; WIESENBORN, D.; GUSTAFON, C. Process model for biodiesel production from various feedstocks. *Transactions of the ASAE*, v. 48, n. 6, p. 2215-2221, 2007. DOI: 10.13031/2013.20068.
- USTAOGLU, A., ALPTEKIN, M. OKAJIMA, J., MARUYAMA, S. Evaluation of uniformity of solar illumination on the receiver of compound parabolic concentrator (CPC), Sol. Energy 132 150–164, 2016. DOI:<<https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.03.014>>.

WAGHMARE, S. A.; GULHANE, N. P. Design and ray tracing of a compound parabolic collector with tubular receiver. *Solar Energy*, v. 137, p. 165-172, 2016. DOI:<<https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.08.009>>.

WANG, J. et al. Process design methodology for Rankine cycle based on heat matching. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 193, 114295, 2024. DOI:<<https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114295>>.

WELFORD, W. T.; WINSTON, R. *The optics of non-imaging concentrators*. New York: Academic Press, 1978. 199 p. DOI: 10.1063/1.2914121.

WINSTON, R. *Selected papers on nonimaging optics*. New York: SPIE Press, 1995. 650 p.

XU, J.; CHEN, F.; DENG, C. Design and analysis of a novel multi-sectioned compound parabolic concentrator with multi-objective genetic algorithm. *Energy*, v. 225, 120216, 2021. DOI:<<https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120216>>.

XU, R. et al. Concentration performance of solar collector integrated compound parabolic concentrator and flat microchannel tube with tracking system. *Renewable Energy*, v. 200, p. 809-820, 2022. DOI:<<https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.09.107>>.

ZHANG, Z. et al. Optimization of design parameters and operation conditions of solar-air source heat pump coupled system for rural buildings in cold and severe cold regions. *Solar Energy*, v. 286, 113147, 2024. DOI:<<https://doi.org/10.1016/j.solener.2024.113147>>.

ZUKAUSKAS, A. Heat transfer from tubes in crossflow. *Advances in Heat Transfer*, v. 8, p. 93-160, 1972. DOI: <[https://doi.org/10.1016/S0065-2717\(08\)70015-0](https://doi.org/10.1016/S0065-2717(08)70015-0)>.

APÊNDICE

Detalhamento do processo de produção na usina de biodiesel

1- Produção de óleo vegetal

Tratamento do caroço de algodão

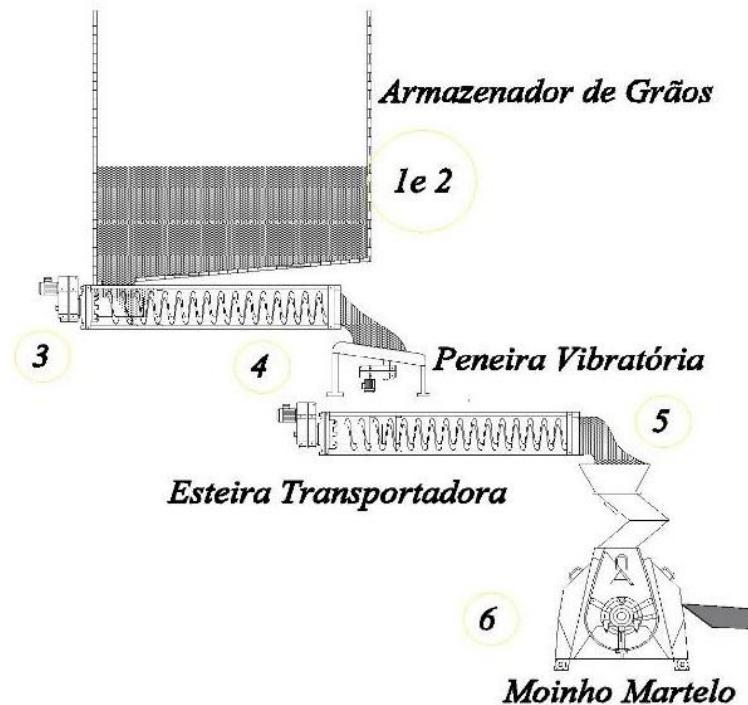
O caroço de algodão, em alguns casos, ainda sem modificações, segue no processo, indo para as *deslindadeiras*, onde são removidos os línteres (fibras), por meio de um ciclone e um ventilador, que farão a sucção das fibras, através de transporte pneumático. Os caroços *deslindados* seguem para as *descortiçadeiras*, que quebram o caroço de algodão, facilitando a separação da casca que protege o caroço da polpa que o envolve, além de preparar a semente para a etapa de extrusão.

A etapa de extrusão representa o ponto crucial desse tipo de processo, onde a extrusora faz com que os grãos sejam desintegrados sobre temperatura e pressão. Neste processo as bolsas de óleo que existem no grão são rompidas facilitando a prensagem. Na prensagem da polpa de algodão é obtido o óleo bruto, e com isso também é obtido o farelo, que nada mais é do que os restos das etapas para o processamento do óleo. Em seguida, o farelo passa por um resfriador rotativo, para possibilitar a sua armazenagem à temperatura ambiente e por um moinho de martelos, cuja função é moer ainda mais o produto. Depois, o farelo cai num silo para o controle de fluxo.

Armazenamento e quebra dos grãos

A Figura 36 mostra o esquema do armazenamento de grãos, os índices 1 e 2 indicam onde os grãos são depositados nas dependências da usina para, em seguida, serem transportados por fuso sem fim (3) e peneira vibratória (4) que retirará parte das impurezas sólidas até cair em outro fuso de transporte e chegar ao moinho martelo (6) que quebrará as sementes.

Figura 36 - Etapa de armazenagem, transporte, peneiramento e quebra de grãos.



Fonte: O Autor (2016)

Processo de semi- refino do óleo bruto

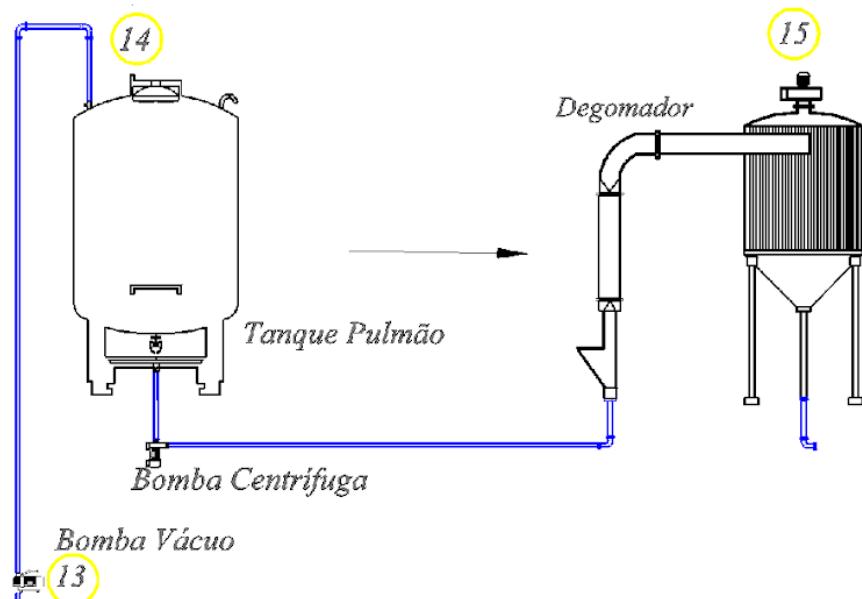
Tem por finalidade reduzir o peso específico do óleo com a retirada de substâncias coloidais, proteínas, fosfatídeos e produtos de decomposição, ácidos graxos livres e seus sais, ácidos graxos oxidados, lactonas, acetais e polímeros, clorofila, xantofila, carotenóides, substâncias voláteis como hidrocarbonetos, álcoois, aldeídos, substâncias inorgânicas como os sais de cálcio e de outros metais, silicatos, fosfatos e umidade. Essa ação facilita o processo de produção de biodiesel, relativo ao consumo energético, mas nem sempre se faz necessário, pois depende do tipo de algodão.

Degomagem

Esse processo tem a finalidade de remover do óleo bruto os fosfatídeos, dentre eles a lecitina, que possui valor comercial, as proteínas e as substâncias coloidais. A degomagem reduz a quantidade de álcali a ser utilizado durante a etapa subsequente de neutralização, o teor de fosfatídeos no óleo bruto de algodão pode alcançar até 6%, sendo opcional a degomagem. Os fosfatídeos e as substâncias coloidais

chamadas “gomas”, na presença de água, são facilmente hidratáveis e tornam-se insolúveis no óleo, o que possibilita sua remoção. A Figura 37 mostra o bombeamento a vácuo do óleo bruto (13), passando pelo tanque pulmão (14) que é destinado ao armazenamento e estocagem do produto em qualquer etapa do processo de produção, fabricado em aço inox, com isolamento térmico, podendo ter agitação fixa ou móvel até chegar ao degomador.

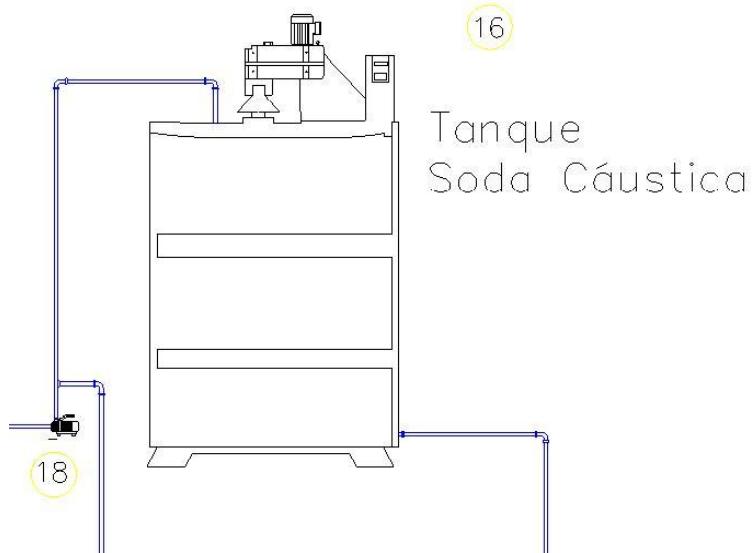
Figura 37 – Fluxo da fase líquida entre o tanque pulmão e o degomador.



Fonte: O Autor (2016)

Em seguida é realizado um clareamento através de um tanque de soda cáustica, Figura 38, que também tem a função de reter elementos sólidos do óleo bruto e ajudar na *desodoração*.

Figura 38 – Tanque para oclareamento do óleo bruto.

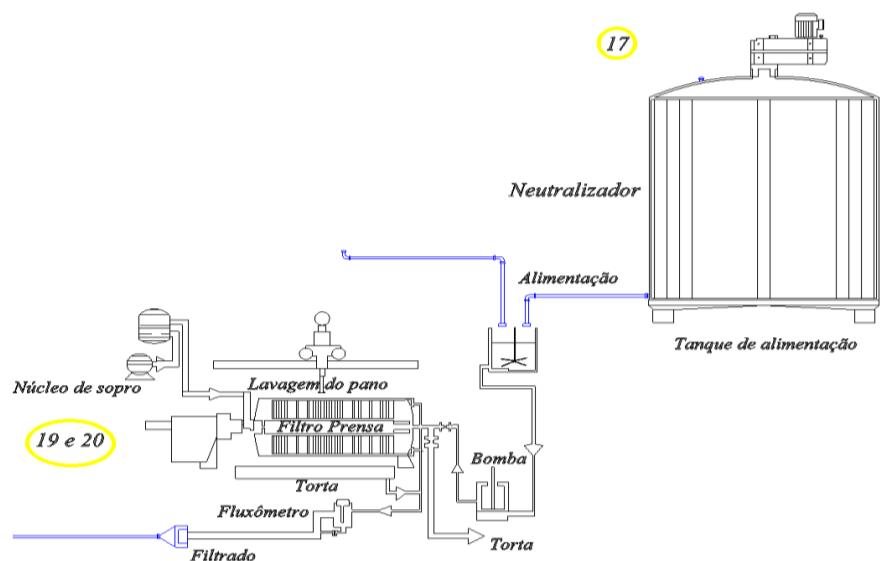


Fonte: O Autor (2016)

Neutralização

A intenção é eliminar do óleo de algodão degomado os ácidos graxos livres e outros componentes definidos como “impurezas” (proteínas, ácidos graxos oxidados e produtos resultantes da decomposição de glicerídeos). O processo, Figura 39, é acompanhado por branqueamento parcial do óleo e ocorre na interfase do óleo e da solução alcalina (Prado et al., 2014).

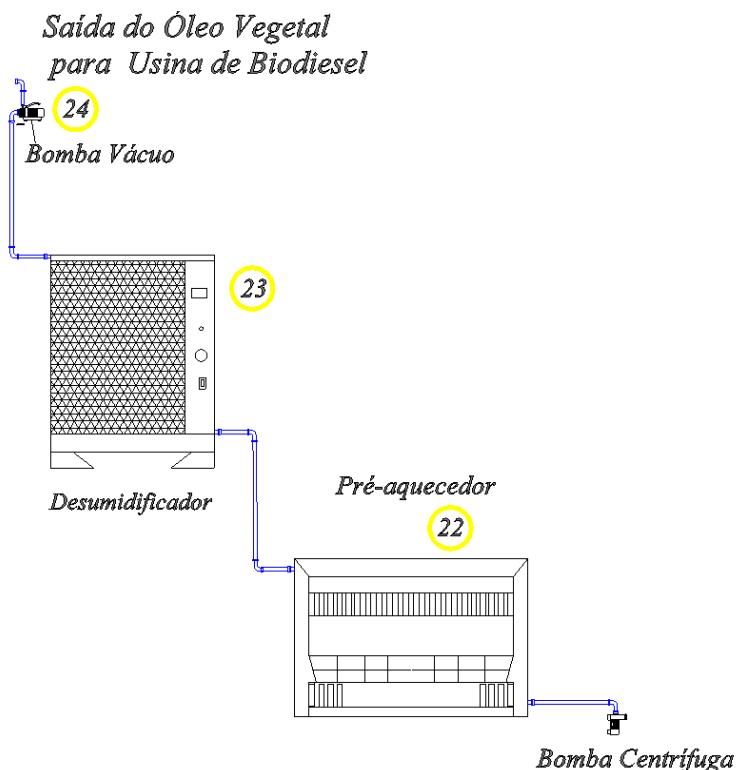
Figura 39 – Neutralização e processo de prensagem.



Fonte: O Autor (2016)

O óleo é aferido por um fluxômetro que se destina a quantificar e indicar a vazão de óleo filtrado que é impulsionado pela pressão do filtro até outro tanque pulmão. A bomba centrífuga transfere o óleo até o pré-aquecedor que recebe calor, por troca térmica, do fluido quente do reator da usina (Figura 40).

Figura 40 - Saída do óleo vegetal

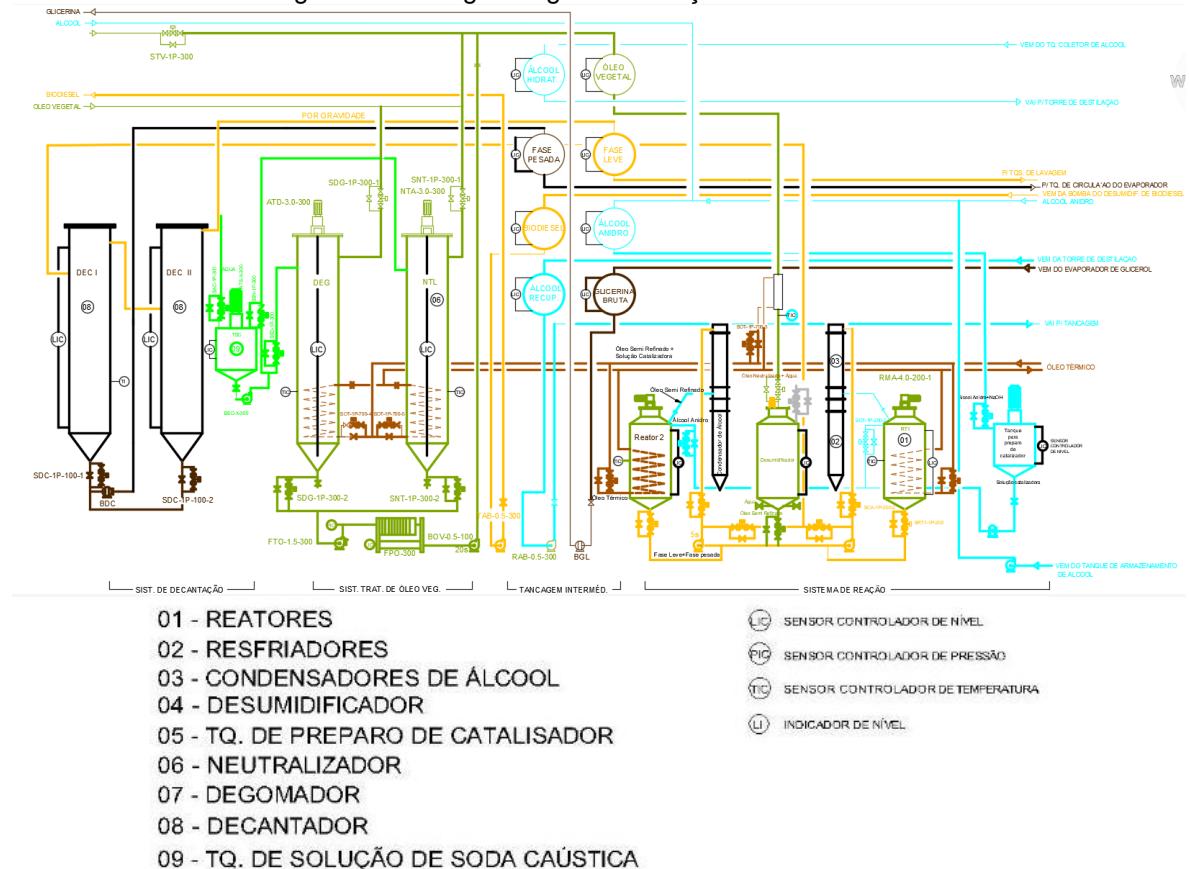


Fonte: O Autor (2016)

2 – Produção de biodiesel

Para o Biodiesel, ao qual podem ser adicionadas substâncias para aumentar o período de conservação, como anti-oxidantes, por exemplo. A glicerina, subproduto resultante do processo de produção de Biodiesel apresenta, hoje em dia, alto valor de mercado, sendo utilizada pela indústria farmacêutica, para produção de anestésicos e xaropes, pela indústria de cosméticos, para produção de cremes dentais e batons e pela indústria bélica, para produção de explosivos, por exemplo. A qualidade do biodiesel produzido no brasil é regulamentada pela ANP. A Figura 41 mostra o diagrama geral de reação do processo de uma Usina Piloto.

Figura 41 - Diagrama geral de reação da Usina Piloto.

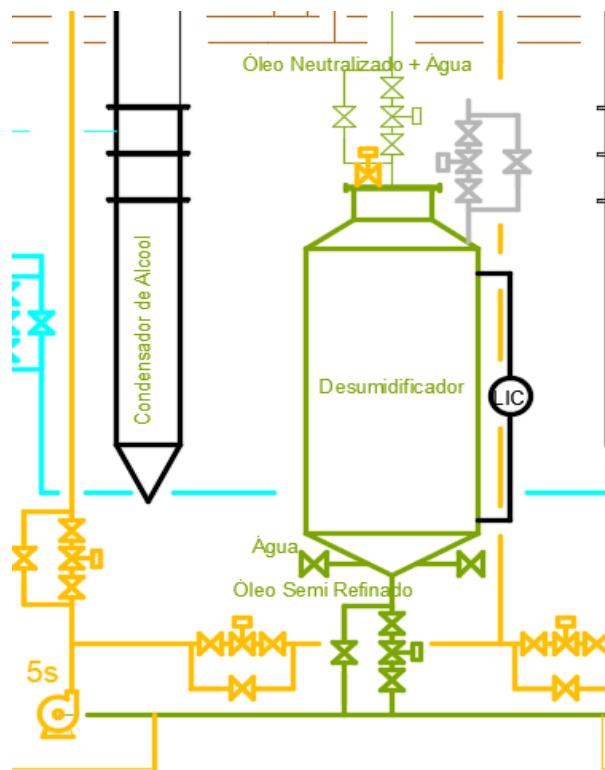


Fonte: Brasbio, 2015

Conceito básico das etapas do diagrama de reação

Com a saída do processo de esmagamento, o óleo bruto de algodão é novamente desumidificado, Figura 42, obtendo assim o óleo semi-refinado.

Figura 42- Equipamentos utilizados na desumidificação do óleo neutralizado.



Fonte: Alterada da Usina de Caetés

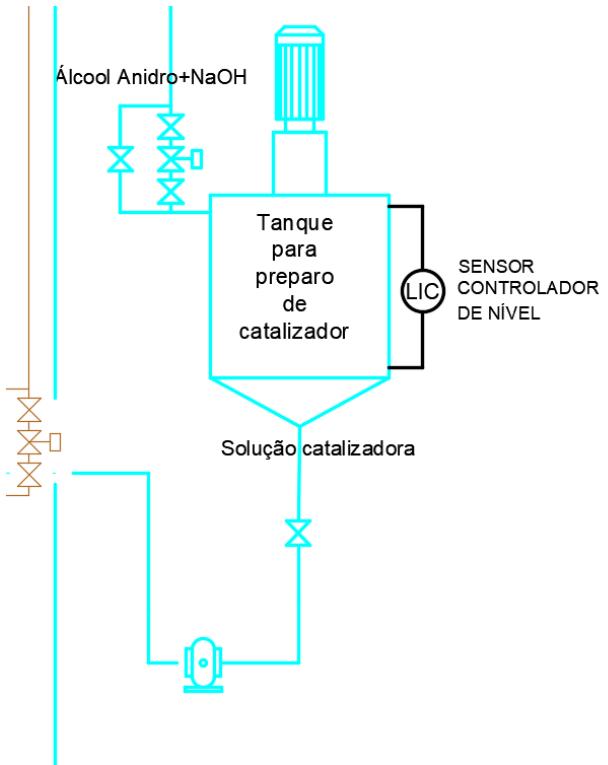
Fluxos de entrada e saída do óleo vegetal

- 1- Óleo neutralizado + Água (l)
- 2- Água (vapor)
- 3- Óleo semi-refinado (OSR)
- 4- LIC – Sensor Controlador de Nível.

No desumidificador, o óleo é aquecido para que o vapor de água seja retirado através de uma purga localizado no topo do desumidificador que funciona pelo jateamento do óleo por bomba centrífuga na entrada do vaso e sucção da umidade pela bomba a vácuo.

Paralelamente, o álcool metílico anidro é bombeado do tanque de armazenamento, na área externa da usina, para o tanque auxiliar de álcool anidro. O hidróxido de sódio é colocado manualmente nos tanques e o álcool escoa, por gravidade, do tanque auxiliar até os tanques de mistura (Figura 43).

Figura 43 - Tanque de preparo do catalisador



Fonte: Alterada da Usina de Caetés.

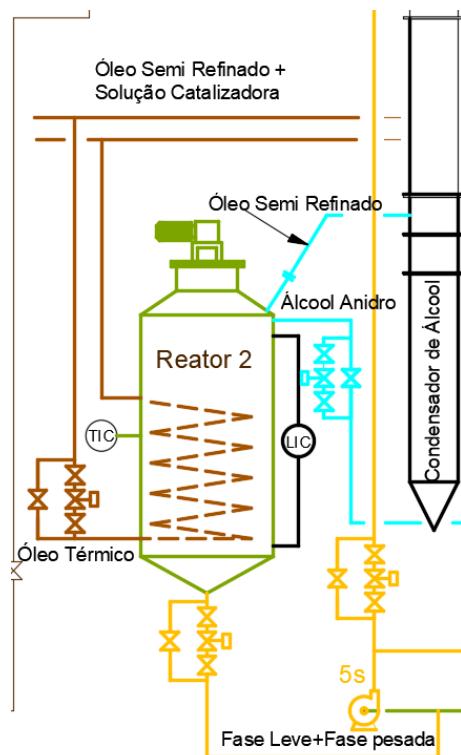
Fluxos de entrada e saída do catalizador

- 1- NaOH
 - 2- Álcool Anidro (OH)
 - 3- Solução catalisadora (SC)

A mistura permanece durante 53 minutos nos reatores a uma temperatura de 43°C durante a transesterificação. O condensador, situado sobre o ciclone, tem a finalidade de reduzir as perdas durante a circulação.

Através do sistema de separação (Figura 44) o produto da reação é dividido em duas fases: a fase do biodiesel (fase leve) e a fase da glicerina (fase pesada). O sistema de separação de fases é formado por dois decantadores em paralelo com uma ligação no topo entre si.

Figura 44 - Volume de controle para transesterificação.

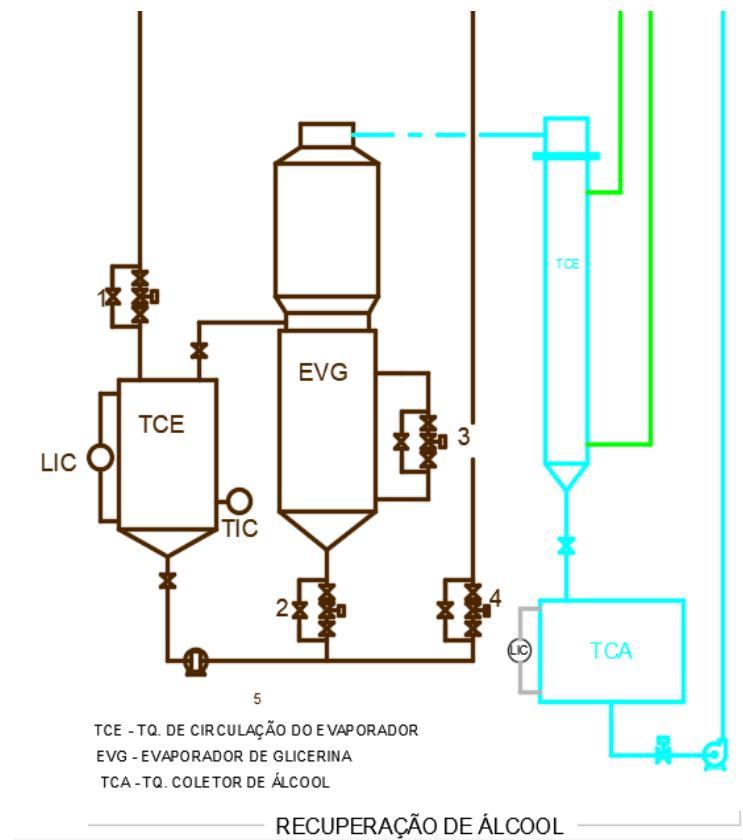


Fonte: Alterada da Usina de Caetés

Esta fase recuperará parte do excesso de álcool utilizado durante a reação de transesterificação. O álcool recuperado é o álcool extraído da fase pesada.

O álcool recuperado do tanque condensado é enviado para o tanque auxiliar de álcool recuperado. Por gravidade, o álcool escoa do tanque auxiliar para o tanque da torre de destilação (Figura 45).

Figura 45 – Volume de controle no sistema de evaporação do álcool da fase pesada.



Fonte: Alterada da Usina de Caetés

Fluxos de entrada e saída do álcool/glicerina

- 1- Fase Pesada
- 2- Fase Pesada + Álcool Hidratado
- 3- Água
- 4-Glicerina Bruta
- 5- Álcool

Após aquecimento, o álcool evaporado escoa pela coluna de destilação até os condensadores horizontais. O álcool anidro condensado escoa, por gravidade, até o tanque auxiliar de álcool anidro.

A fase leve segue para lavagem em um tanque de mistura, onde é adicionada uma solução aquosa de ácido cítrico para neutralizar o excesso de catalisador,

reduzindo o pH e eliminando sabão de ácidos graxos livres, reduzindo a tendência emulsificante.

Valores comparativos do Biodiesel

Eficiência de Conversão: A eficiência de conversão do processo de transesterificação (que é o método mais comum para produzir biodiesel) pode variar entre 90% a 98%. Isso significa que a maior parte do óleo ou gordura utilizada é convertida em biodiesel.

Rendimento de Biodiesel: O rendimento de biodiesel, a partir de óleos vegetais ou gorduras animais, geralmente fica entre 90% a 95% do volume inicial de óleo ou gordura;

Eficiência energética: A eficiência energética do biodiesel, em comparação com combustíveis fósseis pode ser considerada em termos de energia produzida em relação à energia consumida na produção. O biodiesel pode ter um Índice de Retorno de Energia - EROEI que varia de 3:1 a 5:1, dependendo das práticas agrícolas e do processo de produção;

Comparação com outros combustíveis: Comparado ao diesel convencional, o biodiesel pode ter uma eficiência térmica semelhante, mas com a vantagem de ser renovável e ter um perfil de emissões mais favorável.