

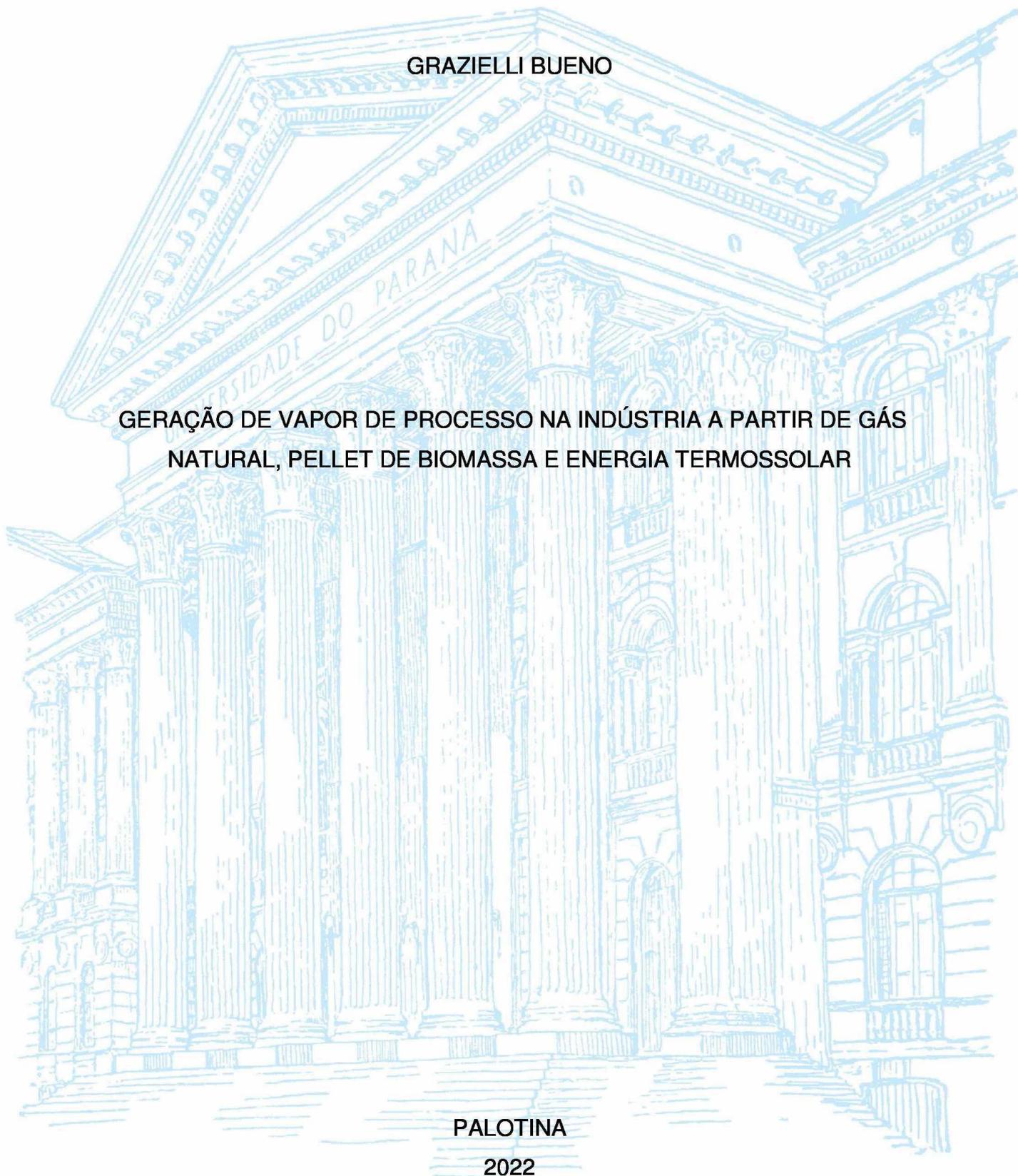
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

GRAZIELLI BUENO

GERAÇÃO DE VAPOR DE PROCESSO NA INDÚSTRIA A PARTIR DE GÁS  
NATURAL, PELLET DE BIOMASSA E ENERGIA TERMOSSOLAR

PALOTINA

2022



GRAZIELLI BUENO

GERAÇÃO DE VAPOR DE PROCESSO NA INDÚSTRIA A PARTIR DE  
GÁS NATURAL, PELLET DE BIOMASSA E ENERGIA TERMOSSOLAR

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Bioenergia, Setor de Palotina, Universidade Federal do Paraná, como requisito final à obtenção do título de Mestre em Bioenergia.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Lucas Konrad Burin

PALOTINA

2022

Universidade Federal do Paraná. Sistemas de Bibliotecas.  
Biblioteca UFPR Palotina.

B928 Bueno, Grazielli  
Geração de vapor de processo na indústria a partir de gás natural,  
pellet de biomassa e energia termossolar / Grazielli Bueno.  
– Palotina, PR, 2022.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná,  
Setor Palotina, PR, Programa de Pós-Graduação em Bioenergia.  
Orientador: Prof. Dr. Eduardo Lucas Konrad Burin.

1. Concentradores Fresnel. 2. Energia termossolar.  
3. Sistema híbrido. I. Burin, Eduardo Lucas Konrad.  
II. Universidade Federal do Paraná. III. Título.

CDU 620.9



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
SETOR PALOTINA  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO BIOENERGIA - UEL -  
UEM - UEPG - UNICENTRO - UNIOESTE - UFPR -  
40002012041P8

## TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação BIOENERGIA - UEL - UEM - UEPG - UNICENTRO - UNIOESTE - UFPR da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da dissertação de Mestrado de **GRAZIELLI BUENO** intitulada: **GERAÇÃO DE VAPOR DE PROCESSO NA INDÚSTRIA A PARTIR DE GÁS NATURAL, PELLET DE BIOMASSA E ENERGIA TERMOSSOLAR**, sob orientação do Prof. Dr. EDUARDO LUCAS KONRAD BURIN, que após terem inquirido a aluna e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestra está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

Palotina, 04 de Agosto de 2022.

Assinatura Eletrônica

05/08/2022 09:37:55.0

EDUARDO LUCAS KONRAD BURIN

Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica

05/08/2022 09:44:02.0

JOEL GUSTAVO TELEKEN

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica

05/08/2022 16:16:13.0

WILSON DE AGUIAR BENINCA

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

---

Rua Pioneiro, 2153 - Palotina - Paraná - Brasil

CEP 85950-000 - Tel: (44) 3211-8529 - E-mail: ppgbioenergiaufpr@ufpr.br

Documento assinado eletronicamente de acordo com o disposto na legislação federal Decreto 8539 de 08 de outubro de 2015.

Gerado e autenticado pelo SIGA-UFPR, com a seguinte identificação única: 212756

Para autenticar este documento/assinatura, acesse <https://www.prppg.ufpr.br/siga/visitante/autenticacaoassinaturas.jsp> e insira o código 212756

Dedico este trabalho aos meus pais, meu irmão e meu marido, por sempre me apoiaram. E em especial, a minha filha Maria Luiza, por ter paciência durante as minhas ausências.

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiro a Deus por guiar os meus passos durante toda esta caminhada.

As minhas amigas Kátia Kobus e Zuleica Becker, que dividiram seus conhecimentos profissionais, me dando força e auxiliando na continuidade deste trabalho. E ao meu amigo Ricardo Alves pelo incentivo em dias difíceis, nos quais não conseguia desenvolver a parte escrita. A Anna, Letícia e Mateus por sempre me ouvirem.

A todos os professores com quem tive o prazer de adquirir conhecimento, que mesmo durante a pandemia Covid-19, fizeram todo o possível para que pudéssemos ter as aulas de forma remota.

Ao meu professor orientador Eduardo Lucas Konrad Burin, pela paciência (principalmente nas crises que tive) e incentivo na orientação deste trabalho. Posso dizer que foi uma grande oportunidade para agregar conhecimento e imenso desafio trabalhar em uma área muito diferente da minha formação, visto que era um assunto completamente novo para mim.

Agradeço aos membros da banca pela contribuição dada para a melhora do trabalho.

Aos meus demais amigos, pelo apoio dado para realização de todo meu estudo.

Tudo parece impossível até que seja feito.

(MANDELA, N.)

## RESUMO

No mundo, o setor industrial consome uma parcela expressiva da energia primária, sabendo que a maior parte do consumo de energia na indústria é o calor encontrado, em sua maioria, em temperaturas abaixo de 400 °C. Com isso, há a busca por alternativas que possam reduzir o consumo de combustíveis fósseis nas indústrias, na qual a energia solar se apresenta como uma opção para integrar as tecnologias solares térmicas a sistemas já consolidados no mercado. Assim, o presente estudo tem como objetivo analisar o potencial econômico de quatro cenários: sendo dois utilizando somente o combustível (gás natural e pellets de madeira); o terceiro apresenta o sistema híbrido gás natural - solar térmico; e, por último, a energia solar térmica combinada com caldeiras de pellets de madeira para gerar vapor de processo, empregando a tecnologia de concentradores Fresnel, sem armazenamento, em diversas cidades do Brasil. A planta foi modelada usando o software SAM, para a geração de vapor pelo campo solar. A análise dos custos do vapor de processo foi obtida através do cálculo que utilizou os parâmetros de Valor Presente Líquido, Taxa Interna de Retorno e tempo de retorno do investimento. Os resultados alcançados por meio do estudo quanto aos custos para gerar vapor de processo mostram que parâmetros como o DNI, os preços dos combustíveis e o custo do campo solar têm um impacto no estudo econômico de plantas híbridas. Dessa maneira, observou-se que, a caldeira que faz uso de pellets de madeira é uma alternativa viável, com LCOH que varia de 112,16 R\$/MWh<sub>th</sub> a 200,27 R\$/MWh<sub>th</sub>. Para a operação híbrida, a concepção gás natural – solar térmica se mostrou viável, principalmente para as cidades de Fortaleza, Belo Horizonte e Recife, promovendo redução no consumo de combustível, e com custo nivelado do calor de 294,35 R\$/MWh<sub>th</sub>, 251,32 R\$/MWh<sub>th</sub> e 248,04 R\$/MWh<sub>th</sub>, respectivamente. A hibridização do sistema Fresnel com a biomassa de madeira não foi viável, por ter o *payback* descontado maior que 25 anos para todas as cidades estudadas. Nesse sentido, a implantação do SHIP em determinadas regiões brasileiras pode ser uma alternativa viável, dessa maneira possibilitando a redução do consumo de combustíveis fósseis no setor industrial, como o gás natural, e por consequência, minimizar a emissão de gases de efeito estufa.

**Palavras-chave:** Concentradores Fresnel. Energia termossolar. LCOH. Pellets de madeira. Sistema híbrido.

## ABSTRACT

In the world, the industrial sector is an expressive part of the primary energy, knowing that most of the energy consumption in the industry is the heat found, in its majority, in temperatures below 400 °C. There is a search for alternative consumption, with savings of fuel raw materials in the facilities, in which solar energy presents an option for systems already consolidated in the market. Thus, the present study aims to analyze the economic potential of four scenarios: two using only natural fuels and wood pellets; the third presents the natural gas - solar thermal hybrid system; and, finally, solar thermal technology combined with process wood pellet boilers, using Fresnel energy without storage, storage in several cities in Brazil. The plant was modeled using SAM software to generate steam by the solar field. Analysis of return on investment costs and time of use of the present value return process, Internal Rate of Return on investment. The profitable results through the study as to the costs to generate NI, the economic costs of the steam field have an impact on the hybrid study. In this way, it was observed that the boiler that uses wood pellets is a viable alternative, with LCOH ranging from 112.16 R\$/MWh<sub>th</sub> to 200.27 R\$/MWh<sub>th</sub>. For the hybrid operation, the creation of natural gas - solar thermal proved to be viable, mainly for the cities of Fortaleza, Belo Horizonte, promoting a reduction in fuel consumption, and with a leveled cost of heat of 294.35 R\$/MWh<sub>th</sub>, 251.32 BRL/MWh<sub>th</sub> and 248.04 BRL/MWh<sub>th</sub>, respectively. Hybridization of the Fresnel system with non-viable wood biomass, as the discounted return is greater than 25 years for all cities studied. In this sense, the implementation of SHIP under certain Brazilian conditions can be an alternative, a way to reduce the consumption of fossil fuels in the industrial sense, such as natural gas, and consequently, minimize the emission of greenhouse gases in the industrial sector.

**Keywords:** Fresnel concentrators. Thermosolar energy. LCOH. Wood pellets. Hybrid system.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1:</b> Mapa da malha de gasoduto de transporte existente e PIG2020 ....	23
<b>Figura 2:</b> Queimador de gás do tipo aspirante .....	29
<b>Figura 3:</b> Queimador de gás do tipo queimada direta .....	30
<b>Figura 4:</b> Caldeira flamotubular para queima de óleo, gás ou combinada .....	30
<b>Figura 5:</b> Caldeira mista para queima de biomassa .....	31
<b>Figura 6:</b> Usina CSP Fresnel (Espanha) .....	33
<b>Figura 7:</b> Usina Solar de Calha Parabólica (Estados Unidos) .....	33
<b>Figura 8:</b> <i>Noor Energy 1</i> (Dubai) .....	34
<b>Figura 9:</b> Sistema de disco parabólico de Infinia .....	34
<b>Figura 10:</b> Total anual de irradiação solar direta normal – regiões com potencial de aproveitamento da energia solar concentrada.....	36
<b>Figura 11:</b> Faixas de temperatura, aplicações e tecnologias CSP .....	37
<b>Figura 12:</b> Sistema de concentrados Fresnel instalado no telhado .....	38
<b>Figura 13:</b> Planta Solar/biomassa que utiliza sistemas CSP .....	41
<b>Figura 14:</b> Principais etapas na simulação para determinar o vapor de processo gerado .....	46
<b>Figura 15:</b> Modelo do sistema híbrido estudado.....	47
<b>Figura 16:</b> Comparativo LCOH do gás natural e pellets de madeira .....	59
<b>Figura 17:</b> Comparação do LCOH do gás natural .....	65
<b>Figura 18:</b> Comparação do LCOH dos pellets de madeira.....	66
<b>Figura 19:</b> <i>Payback</i> descontado versus custo médio específico do GN (cenário C) .....	69
<b>Figura 20:</b> Fatores de correção da eficiência óptica.....	85

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> – Preço médio final do GN (com tributos) .....	24
<b>Tabela 2</b> – Estudos quanto a tecnologia CSP e seus custos para geração de vapor .....	44
<b>Tabela 3</b> – Estudos quanto ao custo do LCOH.....	44
<b>Tabela 4</b> – DNI médio e concessionária de GN, por cidade estudada.....	47
<b>Tabela 5</b> – Preço médio dos pellets de madeira, por cidade estudada.....	48
<b>Tabela 6</b> – Dados gerais do módulo básico ( <i>Fresnel Collector LF-11</i> ) .....	49
<b>Tabela 7</b> – Parâmetros adicionados no SAM para <i>System Design e Solar Field</i> .....	50
<b>Tabela 8</b> – Premissas adotadas para análise de custos do vapor dos sistemas.....	54
<b>Tabela 9</b> – Resultados relativos ao estudo do consumo de GN .....	57
<b>Tabela 10</b> – Resultados relativos ao estudo do consumo de pellets de madeira .....	57
<b>Tabela 11</b> – Dados de dimensões do campo solar e eficiência do <i>loop</i> na condição de projeto.....	60
<b>Tabela 12</b> – Fração solar por cidade estudada.....	60
<b>Tabela 13</b> – Resultados relativos ao cenário estudado (GN – Solar térmica)..	62
<b>Tabela 14</b> – Resultados relativos ao cenário estudado (Pellets de madeira – Solar térmica).....	62
<b>Tabela 15</b> – Resultados econômicos da planta híbrida (GN – Solar térmica)..	64
<b>Tabela 16</b> – Resultados econômicos da planta híbrida (Pellets de madeira – Solar térmica).....	67
<b>Tabela 17</b> – Fração solar anual e valores da área do campo solar .....	70
<b>Tabela 18</b> – Faixa de uso e preços do GN (Curitiba – PR).....	83
<b>Tabela 19</b> – Faixa de uso e preços do GN (Florianópolis - SC).....	83
<b>Tabela 20</b> – Faixa de uso e preços do GN (Campo Grande – MS) .....	83
<b>Tabela 21</b> – Faixa de uso e preços do GN (São Paulo – SP).....	84
<b>Tabela 22</b> – Faixa de uso e preços do GN (Belo Horizonte - MG).....	84
<b>Tabela 23</b> – Faixa de uso e preços do GN (Recife – PE) .....	84
<b>Tabela 24</b> – Faixa de uso e preços do GN (Fortaleza - CE) .....	84
<b>Tabela 25</b> – Fator de correção longitudinal e transversal .....	85

## LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

ANP - Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis

CAPEX - *Capital Expenditure*

C&D - Resíduos de construção e demolição

CC – Campo solar

CGEE - Comitê Gestor de Eficiência Energética

CO<sub>2</sub> - Dióxido de carbono

LFCs - *Linear Fresnel Collectors* (tradução “coletores de Fresnel lineares”)

CEN - Comissão Europeia de Normalização

CO - Monóxido de carbono

CPFL - Companhia Paulista de Força e Luz

CSP - *Concentrated solar power* (Usinas de concentração solar)

DNI - Irradiação normal direta (do inglês, *Direct Normal Irradiation*)

EPE - Empresa de Pesquisa Energética

FOB – *Free on board* (tradução literal “livre a bordo”)

GEE - Gases de efeito estufa

GLP – Gás liquefeito de petróleo

GN - Gás natural

HCC - *Hybrid combined cycle* (tradução Ciclo combinado híbrido)

HCSB - *Hybrid concentrated solar biomass* (tradução Biomassa solar concentrada híbrida)

H<sub>2</sub>S – Ácido sulfídrico

H -Hidrogênio

HTF - *Heat Transfer Fluid* (tradução Fluido de transferência de calor)

IEA - *International Energy Agency*

IPH - *Industrial Process Heat*

IRENA - *International Renewable Energy Agency*

KNO<sub>3</sub> - Nitrato de potássio

LCOE - *Levelized Cost of Energy* (Custo Nivelado da Energia)

LCOH - *Levelized Cost of Heat* (Custo Nivelado do Calor)

MS – Multiplicador solar

MSW - *Municipal solid waste* (tradução “Resíduos sólidos municipais (RSU)”)

N – Nitrogênio

NaNO<sub>3</sub> - Nitrato de sódio

NREL - *National Renewable Energy Laboratory* (tradução “Laboratório Nacional de Energias Renováveis”)

NSRDB - *National Solar Radiation Database*

O<sub>2</sub> – Gás oxigênio

O&M – Operação e manutenção

OIE - Oferta Interna de Energia

OMS - Organização Mundial de Saúde

OPEX - *Operational Expenditure*

PCI – Poder calorífico inferior

PIG - Plano Indicativo de Gasodutos de Transporte

PTC - *Parabolic Trough Collectors* (tradução “coletores de calha parabólica”)

RDF - *Refuse-derived fuel* (tradução “Combustível derivado de resíduos”)

SAM - *System Advisor Model*

SHIP - *Solar Heat for Industrial Process* (tradução “Calor solar para processos industriais”)

SEGS - *Solar Electric Generating Systems*

SMILE - Sistema Solar Híbrido com Microturbina para Geração de Eletricidade e Cogeração de Calor na Agroindústria

SO<sub>2</sub> - Dióxido de enxofre

SRF - Combustível recuperado sólido

STES - *Solar thermal energy storage system* (tradução “energia solar térmico sistema de armazenamento”)

SWERA - *Solar and Wind Energy Resource Assessment* (tradução “Avaliação de recursos de energia solar e eólica”)

TIR - Taxa Interna de Retorno

TMA – Taxa mínima de atratividade

TMY - *Typical Meteorological Year* (tradução “anos meteorológicos típicos”)

UNIFEI - Universidade Federal de Itajubá

USA - *United States of America* (Estados Unidos da América (EUA))

VLP - Valor Presente Líquido

## LISTA DE SÍMBOLOS

°C – graus Celsius

% - percentagem

€ - euro

AU\$ - dólar australiano

bar – unidade de pressão

GW – Giga Watts

K – Kelvin

kg/m<sup>3</sup> - quilograma por metro cúbico

kJ/N.m<sup>3</sup> – quilograma Joule por Normal Metro Cúbico

kWh – quilo Watts hora

kWh/m<sup>2</sup> - quilo Watts hora por metro quadrado

m<sup>3</sup>/d - metro cúbico por dia

MJ kg<sup>-1</sup> – mega Joule por quilograma

MW – megawatts

MWh/m<sup>3</sup> - megawatts hora por metro cúbico

Mtep - mega tonelada equivalente de petróleo

R\$/kWh<sub>th</sub> – Reais por quilo Watts hora térmica

t/h – tonelada por hora

TWh – Tera Watt hora

US\$/t - dólares americanos por tonelada

US\$ - dólares americanos (conforme o Fundo Monetário Internacional)

US\$/MMBtu – dólares por milhão de Unidades Térmicas Britânicas

### **Subscritos**

*b* – Sistema base (gás natural ou pellets de madeira)

*c* - Condensado

*Cb* - Combustível

*cs* - Campo solar

*e* – Energia

*F<sub>s</sub>* – Fração Solar

*gn* – Gás natural

*h* - Horas

*h* - Híbrido

*l* - Longitudinal

*opt* - Óptica

*p* - Pellets

*sm* - *Soiling mirror*

*T* - Total

*t* - Transversal

*th* - Térmica

*v* - vapor saturado

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>18</b>
1.1 OBJETIVO.....	20
1.1.1 Objetivo Geral .....	20
1.1.2 Objetivos específicos.....	20
1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	20
<b>2 REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	<b>22</b>
2.1 CONSUMO DE ENERGIA NO SETOR INDUSTRIAL.....	22
2.2 GÁS NATURAL .....	22
2.3 PELLETS DE MADEIRA .....	24
2.4 VAPOR DE PROCESSO NA INDÚSTRIA .....	27
2.4.1 Geradores de vapor de processo .....	28
2.5 ENERGIA SOLAR TÉRMICA PARA GERAÇÃO DE VAPOR DE PROCESSO.....	32
2.5.1 Concentradores de energia solar .....	32
2.5.2 Incidência de radiação solar no Brasil.....	35
2.5.3 Energia solar térmica na indústria .....	36
2.5.4 Energia termossolar para geração de vapor de processo.....	38
2.6 SISTEMA HÍDRIDOS .....	39
2.7 CUSTOS RELACIONADOS À GERAÇÃO DE VAPOR DE PROCESSO ..	41
<b>3 MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	<b>45</b>
3.1 LOCAIS DE ESTUDO E PREÇOS DOS COMBUSTÍVEIS .....	47
3.2 MODELAGEM DO CAMPO FRESNEL .....	48
3.3 MODELAGEM DAS UNIDADES GERADORAS DE VAPOR.....	51
3.4 ANÁLISE ECONÔMICA .....	53
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>56</b>
4.1 PLANTAS A GÁS NATURAL E PELLETS DE MADEIRA.....	56
4.2 PLANTAS HÍBRIDAS .....	59
4.2.1 Análise termodinâmica dos cenários estudados .....	59
4.2.2 Análise Econômica.....	63
4.3 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE .....	68
<b>5 CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	<b>72</b>
5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	73

<b>REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>74</b>
<b>ANEXO A – PREÇO DO GN CONFORME FAIXAS DE CONSUMO .....</b>	<b>83</b>
<b>ANEXO B – FATORES DE CORREÇÃO (MODELO FRESNEL) .....</b>	<b>85</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Com o aumento acelerado no consumo de energia que sustenta o crescimento da sociedade atual, diversos setores econômicos - industrial, comercial, residencial, entre outros - procuram utilizar fontes alternativas para a produção de energia elétrica e térmica. Com isso, destaca-se a busca pela redução do consumo de combustíveis fósseis, por meio da inovação quanto a processos, materiais, mercadorias e serviços, a fim de minimizar os impactos negativos ao meio ambiente e, principalmente os custos.

Dentre os setores econômicos, o industrial foi responsável por utilizar 38% do total global de energia final em 2020, apresentando um aumento médio anual de 1% no consumo de energia de 2010 a 2019. Isso se deve ao crescimento intensificado do uso de energia por indústrias que produzem produtos químicos, ferro, alumínio, aço, papel e celulose (VASS *et al.*, 2021). No Brasil, por sua vez, a indústria utilizou 32,1% da energia interna ofertada na matriz energética, no ano de 2020 (EPE, 2021).

De acordo com Kumar *et al.* (2021), a maioria das indústrias utilizam combustíveis fósseis para atender às suas necessidades de energia térmica. Tais combustíveis podem ser substituídos por recursos de energia renovável, principalmente a energia solar. Além disso, considerando a frequente instabilidade no preço do barril de petróleo, alternativas dentro das indústrias para reduzir o consumo de gás natural, carvão, entre outros, se tornam cada vez mais favoráveis.

Ainda, os processos industriais foram responsáveis por consumir 51% da energia térmica (calor) no mundo no ano de 2021 (IEA, 2021). Além disso, López (2021) relata que mais de três quartos da demanda mundial de calor na indústria se dá pelo consumo de combustíveis fósseis, e que sistemas renováveis de aquecimento devem crescer 22% no período de 2019 a 2024.

No setor industrial brasileiro, por sua vez, o consumo de energia relacionado com calor de processo representa 80% do consumo energético total, enquanto o de eletricidade tem 20% de participação. Além disso, dentro dos 80% relacionados com o consumo de calor de processo, 52% são obtidos por combustíveis fósseis. Nesse contexto, o consumo de combustíveis fósseis empregado para atender a demanda de calor industrial cresceu 33%, de 26,7

mega tonelada equivalente de petróleo (Mtep) em 1990 para 35,5 Mtep em 2016 (SOLAR PAYBACK, 2019).

Assim, no Brasil, para geração de calor, a lenha e seus derivados se apresentam como alternativas viáveis para substituir os combustíveis fósseis, por não depender diretamente do custo do barril de petróleo, conforme descrito no estudo de Pinheiro (2020), sendo uma opção apresentada por Ramos *et al.* (2017), a utilização de pellets de madeira.

Outra opção identificada para reduzir o consumo de combustível fóssil na indústria consiste no uso da energia solar térmica. Segundo a *International Renewable Energy Agency* (IRENA, 2015), cerca de 50% das demandas para aquecimento necessárias para fins industriais - como secagem, cozimento, limpeza, extração, entre outras - requerem temperaturas inferiores a 250°C. López (2021), ainda, explana que o calor solar para processos industriais (*Solar Heat for Industrial Process* - SHIP) tem potencial para atender a demanda de calor útil, especialmente em setores que necessitam de calor em baixa e média temperatura.

Os sistemas de energia solar concentrada para geração de vapor de processo podem ser hibridizados com outras fontes de calor já utilizadas - combustíveis fósseis ou renováveis, como ser utilizados separadamente ou agregados a outros sistemas de geração de energia, tendo como exemplos os concentradores Fresnel, calha parabólica, entre outros. Com isso, a indústria tem potencial em reduzir custos com combustíveis e CO<sub>2</sub> gerado (AKAR *et al.*, 2021), no qual a energia solar constitui-se em uma alternativa real para cobrir parcialmente essas necessidades de energia (SEPÚLVEDA, 2019).

Diante desse cenário, esta pesquisa propõe alternativas quanto ao uso de energias renováveis, como biomassa de madeira e energia solar concentrada, para atender a demanda de calor de processo da indústria nacional e reduzir o uso de gás natural. Nesse contexto, é avaliado o custo da geração de vapor de processo a partir do uso de caldeiras alimentadas a gás natural, caldeiras alimentadas com pellets de madeira, bem como a integração dos sistemas convencionais a tecnologia de concentradores Fresnel operados em geração direta de vapor.

## 1.1 OBJETIVO

### 1.1.1 Objetivo Geral

Avaliar o custo da geração de vapor de processo a partir da utilização de caldeiras a gás natural e caldeiras alimentadas com pellets de madeira, como também dos sistemas que utilizam GN ou pellets de madeira assistidos por concentradores Fresnel em geração direta de vapor, sem armazenamento de energia.

### 1.1.2 Objetivos específicos

- Avaliar o custo quanto a substituição do gás natural por pellets de madeira na geração de vapor de processo na indústria;
- Avaliar o potencial de economia de combustível a partir da integração de campo solar do tipo Fresnel em paralelo com o sistema convencional de geração de vapor;
- Avaliar o custo quanto a implantação de campo solar do tipo Fresnel na geração de vapor de processo na indústria;
- Avaliar a influência do preço do gás natural e do pellet de madeira no custo de geração de vapor de processo;
- Avaliar a influência do DNI no custo de geração de vapor de processo a partir do uso de energia solar térmica.

## 1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

Com fins organizacionais, esta pesquisa, além da Introdução, está dividida em:

Capítulo 2, apresentando a Revisão de Literatura, que aborda um breve panorama relativo ao consumo de energia na indústria, combustíveis para geração de energia (gás natural, pellets de madeira e energia solar térmica). Seguidamente, apresenta as tecnologias de concentradores solares para geração de energia térmica, suas aplicações e custos no setor industrial. Ainda,

discorre sobre o uso da energia termossolar, na indústria para geração de vapor saturado de processo, sua aplicabilidade em sistemas híbridos e custos.

No Capítulo 3, encontra-se a Metodologia para o desenvolvimento do trabalho, que compreende as premissas adotadas. Além disso, os dados termodinâmicos, tecnologia CSP, *software* para simulação energética do sistema solar térmico e arranjo para hibridização. Por fim, apresenta-se o estudo quanto ao potencial econômico.

O Capítulo 4 relata os principais resultados quanto ao uso de gás natural e de pellets de madeira para geração de vapor saturado na indústria. Em seguida, demonstra as análises quanto a tecnologia Fresnel integrada aos sistemas a gás natural e pellets de madeira (sistema híbrido). Ademais, apresenta o estudo quanto dos custos nivelado de calor.

No Capítulo 5 estão as conclusões obtidas por meio dessa pesquisa, além de sugestões para trabalhos futuros.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

Este capítulo é dedicado a descrever de forma sucinta o papel do combustível fóssil e renovável dentro da indústria. Por fim, apresentar as tecnologias quanto ao uso da energia solar térmica e aplicações híbridas

### 2.1 CONSUMO DE ENERGIA NO SETOR INDUSTRIAL

No que diz respeito ao consumo de energia primária no mercado internacional, o setor industrial tem um impacto significativo, e a energia solar constitui-se em uma alternativa real para cobrir parcialmente essas necessidades de energia (SEPÚLVEDA, 2019).

Em 2020, a Oferta Interna de Energia (OIE) no Brasil, foi de 287,6 Mtep, mostrando recuo de 2,2% em relação a 2019 (MME, 2021). O setor industrial, por sua vez, apresentou um aumento de 3 Mtep em valores absolutos, destacando o segmento de alimentos e bebidas (26,9%) e da indústria de cimento (9,4%) (EPE, 2021).

A indústria, no ano de 2019 teve um consumo final de 9.566 TWh de energia elétrica. Além disso, em escala global, os processos industriais foram responsáveis por consumir 51% de calor, significativamente superior à eletricidade (20%) (IEA, 2021). Segundo (PEREIRA, 2018), no Brasil cerca de 80% da energia total de 2018 se destinou à geração de calor. A EPE (2022), por sua vez, apresentou que em 2021, o consumo de energia na indústria foi de 84,8 Mtep, representada pela participação de 21,6% de energia elétrica (EPE, 2022).

Ademais, no estudo apresentado pela EIA (2019), no período de 2019-2024, a demanda de calor poderá aumentar 9% na indústria, no qual os sistemas que utilizam tecnologias limpas para o aquecimento tendem a ganhar espaço, como a bioenergia, eletricidade renovável e energia solar.

### 2.2 GÁS NATURAL

O consumo de gás natural no mundo varia entre os diversos países e regiões, sendo que no ano de 2020, em decorrência do Covid-19, houve a volatilidade no consumo de combustíveis que dependiam diretamente do valor

do barril de petróleo. Contudo, o consumo de GN, conforme os dados da BP (2021) nas regiões do Médio Oriente tiveram um aumento de 1,2% e Ásia – Pacífico de 0,1%.

Além disso, Leão (2022), descreve que o futuro quanto ao abastecimento de energia em diversos lugares do mundo, principalmente na Europa, é incerto devido o conflito entre a Rússia e Ucrânia, iniciada no ano de 2022. Isso ocorre, devido a Rússia ser um dos maiores fornecedores da indústria de gás natural do mundo. Os desdobramentos quanto ao abastecimento energético global, afetam diretamente a população mundial, com elevação de preços e com possibilidade de escassez. Nesse contexto, os preços do barril de petróleo, segundo Gabrielli e Nozaki (2022) superaram os 130 dólares (US\$) em março de 2022.

A FGV Energia (2020), descreve que no mês de outubro de 2019, o setor industrial brasileiro consumiu 36,5 milhões de metros cúbicos por dia (m<sup>3</sup>/dia) de gás natural (GN), aproximadamente 40% da demanda total.

Segundo a Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2020) a malha brasileira de gasodutos de transporte existente tem 9,4 mil km de extensão e estudos quanto a futuras instalações, de acordo com o Plano Indicativo de Gasodutos de Transporte (PIG) do ano 2020 (Figura 1). Além disso, o relatório indica que desde o ano de 2011 não houve crescimento dessa malha, sendo que 10 das 27 unidades federativas ainda não possuem gasodutos de transporte.

**Figura 1:** Mapa da malha de gasoduto de transporte existente e PIG2020



**Fonte:** EPE (2020)

A Petrobras relatou que quase 40% da demanda de gás natural da empresa é utilizada para o mercado térmico, e que em 2022, o impacto a ser deixado pela guerra entre Rússia e Ucrânia, é a projeção da alta no valor do GN (ALMEIDA, 2022). Em decorrência desse aumento, as indústrias passarão a ter maiores custos em seus processos de geração de vapor.

O boletim mensal de acompanhamento da indústria brasileira, do Ministério de Minas e Energia (MME), referente ao mês de fevereiro de 2022, apresenta os preços do segmento industrial dentro da faixa de consumo de 2000 a 50000 metros cúbicos por dia ( $m^3/d$ ), sendo considerada a média simples dos preços aplicados pelas distribuidoras, com tributos (Tabela 1). Ao comparar o mês de janeiro com fevereiro de 2022, nota-se um aumento maior que 3% por  $m^3$  em um curto período.

**Tabela 1** – Preço médio final do GN (com tributos) – Janeiro e Fevereiro, 2022

Segmento	Faixa de consumo	Janeiro (R\$/ $m^3$ )	Fevereiro (R\$/ $m^3$ )	Janeiro (US\$/MMBtu)	Fevereiro (US\$/MMBtu)
Industrial ( $m^3/d$ )	2000	3,85	3,98	18,64	19,71
	20000	3,39	3,51	16,42	17,39
	50000	3,36	3,48	16,26	17,22

FONTE: Adaptado do MME (2022)

Assim, observa-se que o consumo de gás natural no Brasil cresce de maneira discreta a cada ano, identificando as indústrias como promissoras interessadas no uso do gás natural. Contudo, deve-se levar em consideração que uma das desvantagens é que o gás natural é um combustível fóssil, e depende diretamente da variação diária do preço do barril de petróleo. Entretanto, ao compará-lo a outros combustíveis fósseis, apresenta baixa emissão de poluentes atmosféricos, quando se considera uma combustão limpa.

### 2.3 PELLETS DE MADEIRA

Biomassa compreende todas as matérias orgânicas, excluindo os combustíveis fósseis. Cardoso (2012) descreve que a biomassa, para fins energéticos, é classificada em três categorias: florestal, agrícola e rejeitos urbanos e industriais. O potencial energético de cada um desses grupos depende tanto da matéria-prima quanto da tecnologia utilizada no processamento. Além disso, para se tornar sustentável, a biomassa de madeira

deve ser utilizada quando a oferta de insumos se dá pelo manejo florestal adequado ou resíduos florestais, industriais ou urbanos, do qual a madeira utilizada não pode ser de desmatamento (VIDAL e HORA, 2011).

Ainda, Orellana (2019) relata que a classificação dos resíduos de madeira pode ser quanto a sua origem, sendo os de resíduos industriais de madeira que se classificam em serragem, cepilho, sólidos de madeira, cascas, maravalha, entre outros. Como também, os resíduos urbanos que são os retirados das construções e obras civis, as podas de árvores e o comércio de produtos em geral.

Dentre os resíduos estudados por Orellana (2019), a madeira de madeireira e de construção civil, e a palha e sabugo de milho são os resíduos que apresentam as características desejáveis para geração de energia. Além disso, na análise econômica, os pellets se mostraram viáveis em escala industrial, se comparado ao briquete.

Os pellets são geralmente produzidos utilizando-se resíduos oriundos de florestas plantadas, apresentam baixo teor de umidade e isenção de resinas, e teor de cinzas que gira em torno de 1% a 3%, (REIS, 2020). Ainda, de acordo com Pereira (2019), os pellets de madeira têm como diferencial energético a sua energia específica, de 3,12 MWh/m<sup>3</sup>, que ao ser comparada com o cavaco (0,6 MWh/m<sup>3</sup>), é cerca de cinco vezes maior, mostrando-se assim, como um biocombustível com potencial para ser utilizado em indústrias.

Quanto à matriz energética, de acordo com Pereira (2019), a Europa é o maior consumidor e importador de pellets do mundo. Observa-se também que houve aumento no consumo da biomassa sólida que, geralmente, é composta por madeira - pellets, cavaco, briquete, entre outros. Ademais, Pereira (2019) relata que cerca de 55% da biomassa de madeira consumida durante o ano de 2018 no mundo foram a lenha ou o carvão vegetal, usados para cozimento ou aquecimento de residências, principalmente nos países em desenvolvimento, nos quais a queima da biomassa ocorre de forma ineficiente, sem aproveitar integralmente o calor gerado.

No Brasil, o consumo de pellets ainda ocorre em pequena escala e relacionado às necessidades de energia térmica para aquecimento em padarias, lavanderias, indústrias de alimentos, entre outros (ORELLANA, 2019). Mesmo que se destaque como um dos países em que existem florestas energéticas em

larga escala, tendo como vantagens o fato da colheita do produto não ser anual, assim o produtor pode aguardar o momento que tenha melhores valores para venda, com isso obtendo melhores lucros. Contudo, deve-se observar que existe uma tendência na elevação do valor para aquisição de terras brasileiras, e que a produção da floresta energética necessita de mão de obra, mudas, adubo, colheita, entre outros (VIDAL e HORA, 2011).

Ao tratar sobre os preços dos pellets de origem florestal, que na maioria das vezes são mais estáveis do que os dos combustíveis fósseis, tornando-se uma biomassa atrativa para países que tenham interesse em diversificar a matriz energética (QUÉNO, 2019). De acordo com Kosman (2019), o biocombustível de pellets de madeira, no mercado global, atingiu um faturamento de US\$ 8,5 bilhões no ano de 2019, e estima-se que até 2025 a receita cresça a uma taxa de 8% ao ano. Ainda que o Brasil não seja um dos principais exportadores de pellets de madeira do mundo, Schettini *et al.* (2016) descrevem que no mercado em 2012 foram exportadas 6 toneladas do produto, e em 2014 teve um valor de 6660 toneladas, apontando que o país tem condições de se inserir no mercado.

Ainda, entre os anos de 2009 a 2015 o preço médio global dos pellets de madeira no mercado foi de cerca de 169 US\$/t para consumidores industriais. Com valor elevado em 2014 de 185 US\$/t. Por ter uma variação nos preços, descrevem que há a necessidade de aumentar a maturidade do mercado, incluindo maior integração dos mercados residencial e industrial, que pode resultar em menores flutuações de preços e, portanto, menor risco para produtores e consumidores (THRÄN *et al.*, 2018).

Garcia *et al.* (2017) indicam os preços de pellets de madeira empregados no Brasil, sendo vendidos de 400 a 600 reais por tonelada, com uma média de 471,15 reais (FOB - *Free on board*)<sup>1</sup> para pellets retirados diretamente na fábrica.

Ademais, Tavares e Tavares (2015) relatam que o entrave encontrado no Brasil para a consolidação do negócio de pellets se encontra na dependência de importar as máquinas peletizadoras de elevado custo. Nesse contexto, para

---

<sup>1</sup> *Free on board* (FOB): são os preços das mercadorias excluindo o pagamento de fretes, seguros, impostos e taxas de embarque (IPEA, [20--]). Assim, o comprador assume custos e riscos do transporte do produto a partir do seu embarque até o destino final para desembarque.

ser economicamente viável, uma fábrica deve produzir no mínimo 350 toneladas de pellets por mês, tendo como investimento inicial mais de 2 milhões de reais e, ao se levar em consideração as desvantagens e o valor a ser investido, nem sempre se mostrará favorável à sua implantação.

Além disso, uma planta em escala industrial necessita de uma elevada quantidade de biomassa anualmente (TILAHUN *et al.*, 2021). No Brasil, as empresas que atuam na fabricação de pellets e fazem uso da matéria-prima como a serragem, o cavaco de madeira, o pó de pinus, entre outros derivados da lenha, ainda são consideradas relativamente jovens (criadas a partir de 2004 e 69% surgiram após 2012) (GARCIA *et al.*, 2017). Neste contexto, verifica-se que pode ocorrer a falta do produto para atender à demanda industrial. Desse modo, torna-se indispensável a análise quanto ao investimento a ser efetuado, para que não haja perdas futuras devido à indisponibilidade de pellets.

Uma das vantagens do pellet está relacionado ao baixo teor de umidade, o que, de acordo com Lethikangas (2001), limita o aparecimento de micro-organismos e bolores. Carvalho (2011) relata que por se tratar de um biocombustível, o pellet tem menor volatilidade que os gases ou óleos o que diminui a chance de que aconteça explosões.

Os pellets de madeira, por sua vez, podem ser considerados como uma alternativa de fonte de energia renovável que possibilita a diversificação de processos industriais que tenham a necessidade de gerar vapor saturado, podendo substituir com eficiência o uso da lenha comum, o óleo combustível e o gás natural. Desse modo, a densificação de biomassa, contribui para melhorar a qualidade do combustível e reduz custos de manuseio e transporte (SAIDUR *et al.*, 2011), e com o aproveitamento dos espaços de armazenamento.

## 2.4 VAPOR DE PROCESSO NA INDÚSTRIA

A energia térmica é amplamente empregada na indústria. Para a extração de matérias-primas até o processamento de alimentos, o calor é essencial nos setores de processamento e manufatura (KURUP; ZHU; TURCHI 2016). De acordo com a Solar Payback (2018) as temperaturas tipicamente empregadas em processos industriais podem ser classificadas em três faixas, sendo abaixo de 150 °C (baixa temperatura) utilizada para ebulição,

pasteurização, esterilização, secagem, lavagem, cozimento, entre outros; a faixa de 150 a 400 °C (Média temperatura) aplicada na destilação, fusão do nitrato, tingimento e compressão e acima de 400 °C (alta temperatura) empregada em processos de transformação de materiais.

A demanda térmica, na indústria mundial, geralmente é atendida por meio do suprimento de água quente e de vapor saturado obtidos pela queima de óleo combustível, gás natural, carvão, biomassa, entre outros (ALMEIDA, 2018). E, de acordo com Vajen *et al.* (2012), empresas dos setores de alimentos, bebidas e têxteis oferecem opções para a integração de energia solar térmica para o suprimento das demandas de calor de processo.

O vapor de processo no setor industrial brasileiro, em geral, é produzido por caldeiras que funcionam com óleo, carvão, eletricidade ou biomassa. Entre essas, as movidas por meio da biomassa são as mais utilizadas e consomem diversas matérias-primas, como o bagaço de cana-de-açúcar, o cavaco de madeira, a lenha e a palha de arroz (ROCCO e MORABITO, 2012).

Ainda, para as empresas brasileiras de extração de óleo vegetal de soja, Meyer (2018) descreve que o vapor é um dos insumos utilizados na transmissão de calor em diversos equipamentos e etapas do processo. Ao ser aplicado, impacta diretamente na qualidade dos produtos finais, além de ser relevante quanto a perspectiva financeira, uma vez que os gastos envolvidos com a sua geração representam até 40% dos custos variáveis da fábrica.

Siqueira Neto (2018) relata que nas indústrias de alimentos é comum a autoprodução de vapor em caldeiras de baixa pressão. Estes equipamentos normalmente operam com pressões de até 10 bar absoluto e buscam atender o consumo instantâneo de vapor saturado.

#### 2.4.1 Geradores de vapor de processo

As caldeiras ou geradores de vapor são equipamentos construídos para aproveitar a energia liberada pela queima de um determinado tipo de combustível (BAZZO, 1995).

Ao analisar o processo produtivo no qual a caldeira estará inserida, pode haver influência quanto as configurações que proporcionem um melhor

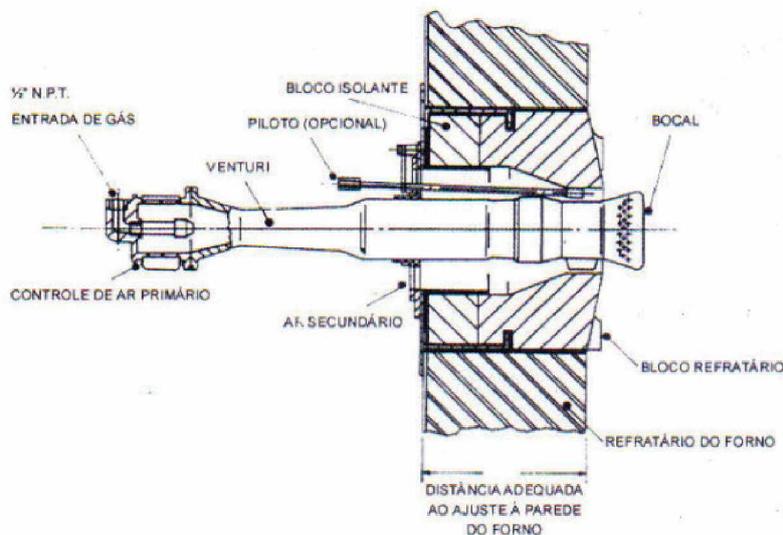
rendimento na troca térmica (BIZZO, 2003), como sua geometria, o tipo, a pressão de trabalho, tipo de combustível, entre outros.

Bizzo (2003) descreve que a grande maioria das unidades geradoras de vapor utilizam a queima de combustíveis, o seu rendimento está associado à localização dos gases e da água nos tubos no qual ocorre a troca térmica, podendo ser do tipo flamotubulares, aquatubulares ou mistas.

Caldeiras flamotubulares são construídas de forma que a água circule ao redor de diversos tubos que são montados entre espelhos na forma de um único feixe tubular e dentro dos quais passam os gases de combustão. Embora tenham um rendimento térmico, na ordem de 84%, este tipo de caldeira pode ser utilizado somente para baixa produção de vapor e baixa pressão. Ainda, as caldeiras flamotubulares podem ser construídas com fornalhas internas ou externas, sendo as de fornalhas internas projetadas para queimarem gás natural ou óleo (BAZZO, 1995).

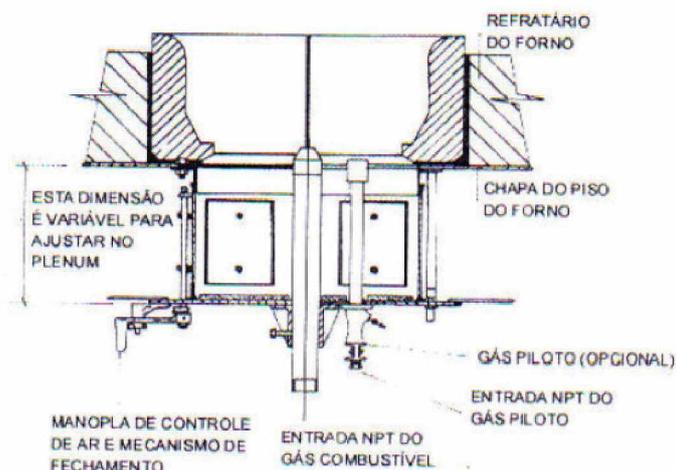
Para que ocorra a queima do gás em uma fornalha, o equipamento utilizado é o queimador, que tem a função de promover uma mistura eficiente, dosar o combustível e o ar de forma que a chama seja estável as proporções devem estar dentro dos limites de flamabilidade (MONTEIRO JUNIOR, 2008). Os queimadores de gases podem ser aspirantes e de queima direta (Figuras 2 e 3).

**Figura 2:** Queimador de gás do tipo aspirante



**Fonte:** GARCIA (2002)

**Figura 3:** Queimador de gás do tipo queimada direta



**Fonte:** GARCIA (2002)

No Brasil, as caldeiras flamotubulares representam mais de 90% das caldeiras utilizadas. Dessa maneira, são voltadas para atender instalações de pequeno porte, como hospitais, lavanderias, hotéis, indústria alimentícia, frigoríficos, entre outros (BOTELHO; BIFANO, 2015). Além disso, apresentam capacidade de produção de vapor geralmente limitada a 10 t/h e pressões de até 10 bar (algumas vezes podendo atingir 15 ou 20 bar) BIZZO (2003).

No geral, as caldeiras flamotubulares (Figura 4) são compactas, que facilita a instalação, ainda e tem fácil manutenção (ALFA LAVAL, 2022).

**Figura 4:** Caldeira flamotubular para queima de óleo, gás ou combinada



**Fonte:** Alfa Laval (2022)

Ainda, são encontradas caldeiras de grande porte na configuração aquatubular, nas quais o fluido a ser evaporado é mantido no interior dos tubos

do trocador de calor, que por sua vez são expostos ao escoamento externo dos gases de combustão (BIZZO, 2003). As caldeiras aquatubulares são normalmente empregadas para geração termoelétrica.

Para a queima de lenha, cavaco, briquete, pellet ou qualquer outro tipo de biomassa, Bazzo (1995) define que as caldeiras híbridas ou mistas são as que devem ser utilizadas para geração. A solução híbrida se dá por apresentar o corpo superior flamotubular e fornalha lateral aquatubular.

As fornalhas de grelha ou as de queima em leito fluidizado, são exclusivas para queima de combustíveis sólidos (BAZZO, 1995). De acordo com Stultz (1992), devido as partículas finas presentes na biomassa, muitas vezes torna-se necessário ter um distribuidor, com isso, as partículas mais finas queimam em suspensão e são carregadas pelo fluxo de ar, já as partículas e materiais mais grossos, queimam sobre a grelha.

Mororó (2016) relata que, em geral, caldeiras híbridas não proporcionam as vantagens da aquatubular, como a segurança e a maior eficiência térmica, porém, é uma solução prática e eficiente quando se tem disponibilidade de combustível sólido.

Por sua vez, a biomassa (lenha em toras, pellets e cavaco) também pode ser queimada em caldeiras (Figura 5), que tem características construtivas que resultam em uma caldeira de baixo consumo de combustível e alta confiabilidade operacional (ALFA LAVAL, 2022).

**Figura 5:** Caldeira mista para queima de biomassa



**Fonte:** Alfa Laval (2022)

## 2.5 ENERGIA SOLAR TÉRMICA PARA GERAÇÃO DE VAPOR DE PROCESSO

Sepúlveda *et al.* (2019) relatam que, embora tenha sido comprovada com resultados satisfatórios a possibilidade de utilizar a energia solar em processos industriais, o seu papel na indústria ainda é reduzido, provavelmente devido à falta de conhecimento sobre a tecnologia pelo usuário final. Além disso, no Brasil, a tecnologia de concentradores solares tem custo elevado.

### 2.5.1 Concentradores de energia solar

Neste tópico há uma breve descrição sobre concentradores de energia solar que são sistemas desenvolvidos para que calor possa ser fornecido em temperaturas mais elevadas. Todavia, Almeida (2018) descreve que também são encontrados coletores de energia solar que fazem captação direta da energia solar, ou seja, transferem a energia da radiação solar para um fluido de trabalho que escoar ao longo do coletor.

Dessa maneira, o funcionamento dos sistemas CSP ocorre por meio da concentração dos raios do sol, os quais são concentrados através do redirecionamento feito por espelhos, assim obtendo maior fluxo térmico, ou seja, faz-se o uso de uma parcela do calor gerado para o aquecimento de fluido (IRENA, 2020), o empregando na forma de vapor.

As principais tecnologias CSP encontradas são os concentradores Fresnel, calhas parabólicas, torre central e discos parabólicos, nas quais as diferenças dos concentradores solares podem ser quanto aos refletores utilizados (planos e côncavos), a quantidade de eixos do sistema mecânico de seguimento solar e a área de concentração solar.

Schlaifer (2013) descreve que coletor Fresnel é composto por vários espelhos planos ou ligeiramente curvados que podem ser orientados de forma independente, a fim de rastrear o Sol e aproximar uma concentração parabólica em um tubo absorvedor, instalado a cerca de 10 metros de altura e situado acima dos espelhos (Figura 6).

**Figura 6:** Usina CSP Fresnel (Espanha)

**Fonte:** ILDEFONSO (2019)

O sistema do tipo calhas parabólicas (Figura 6), por sua vez, opera e produz calor com a temperatura entre 50 e 400 °C, sendo constituído de: 1. Conjuntos de coletores a forma de parábola, normalmente dispostos em fileiras paralelas; 2. Tubo de vidro coberto por um tubo de metal preto localizado na linha focal do receptor; 3. Rastreamento do Sol, no qual a seleção da orientação geralmente varia de aplicação em aplicação, considerando a variação sazonal ao selecionar a orientação. O mecanismo de rastreamento é uma parte sensível dos coletores solares, por seguir o sol com um certo grau de precisão, além de proteger o coletor em caso de risco ambiental - rajadas de vento, superaquecimento, entre outros – (KUMAR *et al.*, 2019).

**Figura 7:** Usina Solar de Calha Parabólica (Estados Unidos)

**Fonte:** ILDEFONSO (2019)

Os concentradores lineares (Fresnel e calha parabólica) têm algumas vantagens sobre os concentradores pontuais, sendo: 1. Os lineares têm sistema de seguimento solar simples por necessitarem apenas de um eixo para seguir o Sol; 2. Os coletores são alinhados na direção Norte-Sul e seguem o Sol na direção Leste-Oeste. Como desvantagem, apresentam menor concentração da radiação e, conseqüentemente, atingem menores temperaturas (GHARBI *et al.*, 2011).

Na tecnologia de usinas de energia de torre solar, apresentada na Figura 8, o campo solar compõe-se de milhares de espelhos planos chamados heliostatos, que fazem o rastreamento do Sol de forma individual com um sistema de dois eixos e concentrando a radiação em um receptor montado no topo de uma torre alta. Os fluidos que usualmente podem ser utilizados para o aquecimento são sal fundido de nitratos de sódio ( $\text{NaNO}_3$ ) ou de potássio ( $\text{KNO}_3$ ), ou água, gerando o vapor. A luz solar concentra-se entre 300 e 1500 vezes no receptor, o que permite atingir temperaturas entre 800 e 2000 °C. Portanto, o sistema de usinas de torres solares é capaz de atingir uma eficiência superior às outras tecnologias (SCHLAIFER, 2013).

**Figura 8:** *Noor Energy 1* (Dubai)



Fonte: ENERGÍAS RENOVABLES (2020)

O sistema de disco, por sua vez, concentra a radiação solar no foco da parabólica (Figura 9), assim as temperaturas localizadas nessa região podem alcançar até cerca 1000 °C. Por possuir dois eixos de rotação a superfície do disco parabólico, tende a sempre estar em uma posição ideal em relação ao Sol, dessa forma, evita que se tenha perdas de cosseno, portanto, apresentando um elevado potencial de eficiência de conversão solar, comparada a todas tecnologias CSP (LOVEGROVE e CSIRO, 2012).

**Figura 9:** Sistema de disco parabólico de Infinia



Fonte: SCHLAIFER (2013)

Akar *et al.* (2022) relatam que as tecnologias de calor de processo industrial solar, por meio de concentradores de energia solar, são viáveis economicamente para suprir as necessidades de vapor ou calor em muitas indústrias, fornecendo fluidos de transferência de calor de alta temperatura, como água pressurizada, óleo sintético ou vapor direto.

### 2.5.2 Incidência de radiação solar no Brasil

De acordo com Tolmasquim (2016) o elevado índice de irradiação em quase todo o território nacional, torna favorável para o aproveitamento da fonte solar. Uma vez que o Brasil se encontra em uma região com incidência mais vertical dos raios solares, e por ter proximidade com a linha do Equador (pouca variação de incidência ao longo do ano), e mesmo que durante o inverno pode ser encontrado bons níveis de irradiação.

Peterseim *et al.* (2013) afirmam que para projetos de geração elétrica de usinas CSP híbridas, ou seja, aquelas que utilizam outra fonte de calor combinada com a energia solar, são viáveis para valores de DNI  $\geq 1.700$  kWh/m<sup>2</sup>-ano, e com valores maiores permite-se que tenha menores custos de geração. Com isso, variadas regiões no mundo se tornam ideais para implantação da tecnologia CSP, tanto para geração de eletricidade como para calor de processo.

O Brasil, por sua vez, possui uma área em destaque com irradiação direta anual acima de 1800 kWh/m<sup>2</sup> (Figura 10), que pode ser utilizada em diversas aplicações para a geração de calor para processos industriais. Destacando as regiões que vão desde o Nordeste, passando pelo Centro-Oeste e interior do Sudeste, que engloba áreas com produção industrial e agrícola, densamente povoada e com desenvolvimento econômico. Com isso, essas regiões têm um elevado potencial de aproveitamento da energia solar concentrada, o que torna favorável para a implantação de novas tecnologias (PEREIRA *et al.*, 2017).



**Figura 11:** Faixas de temperatura, aplicações e tecnologias CSP

Fonte: SOLAR PAYBACK (2018)

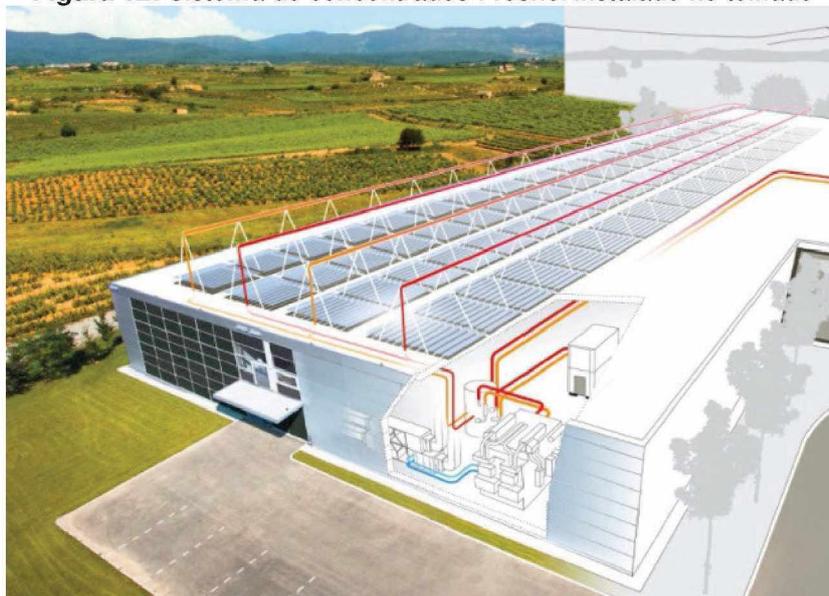
As tecnologias solares térmicas contribuem com menos de 0,02% da quota de demanda de calor na indústria mundial. No entanto, está em expansão, com 7% de crescimento a cada ano, o que significa uma nova capacidade instalada de 37,6 MW<sub>th</sub> em 2018, na qual a China foi responsável por mais da metade das adições da área de coletores, seguido pelo México (13%), França (10%) e Índia (7%) (IEA, 2019).

De acordo com López (2021) quanto ao ponto de vista técnico, há a necessidade de assegurar o fornecimento de calor, que depende da radiação solar, que não é contínua. Outra barreira técnica importante é a disponibilidade de espaço para instalação da usina solar.

Ademais, o problema quanto a área disponível para instalação de um sistema SHIP, pode ter como uma possível solução a descrita pela Industrial Solar (2021) relata que sistemas CSP podem ser instalados em telhados (Figura 12), portanto, tendo uma opção para empresas com espaços limitados. Além disso, há um projeto de concentradores solares Fresnel, para telhados inclinados, que integra passagens e grades leves diretamente na estrutura do

coletor, ou ainda, integrá-los a corrimão e rodapé de passarelas, e outros acessórios.

**Figura 12:** Sistema de concentrados Fresnel instalado no telhado



Fonte: INDUSTRIAL SOLAR (2021)

A Solar Payback (2018) relata que quatro setores industriais brasileiros - alimentos e bebidas, papel e celulose, indústrias químicas, têxtil e couro - são apropriados para SHIP, por terem sua demanda de calor em temperaturas abaixo de 400 °C. Entretanto, Bezerra (2017) descreve que há um projeto voltado para geração de calor no Brasil, que se encontra em uma indústria do ramo alimentício, localizada na cidade de Recife, estado de Pernambuco, em que é utilizado um campo solar cilíndrico parabólico capaz de fornecer água pressurizada a 110 °C, temperatura essa empregada para limpar, secar e pasteurizar alimentos. E, para geração de vapor saturado em processos industriais, ainda não existe plantas em funcionamento.

#### 2.5.4 Energia termossolar para geração de vapor de processo

Atualmente, o vapor é um dos mais importantes transportadores de energia junto com a eletricidade na indústria (LÓPEZ, 2021). Em processos industriais que requerem vapor saturado, uma das alternativas promissoras é a energia solar térmica, em que a integração de tecnologias CSP depende da demanda de calor, da temperatura necessária e o espaço disponível (KUMAR *et al.*, 2019).

Segundo Farjana *et al.* (2018) a energia solar térmica pode ser usada para processos de geração de vapor em indústrias cervejeira, farmacêutica, de processamento de minerais, entre outras. Ainda, Akar *et al.* (2022) relatam que as tecnologias de calor de processo industrial solar, por meio de concentradores de energia solar, são viáveis economicamente para suprir as necessidades de vapor ou calor em muitas indústrias, fornecendo fluidos de transferência de calor de alta temperatura, como água pressurizada, óleo sintético ou vapor direto.

De acordo com o estudo de Soria *et al.* (2020) o Equador tem um potencial técnico médio para aplicações de concentração solar que buscam gerar calor de processo, se comparado a regiões que tenham maior DNI. Contudo, ao analisar a tecnologia de coletores Fresnel lineares verificou que há um potencial para gerar vapor em temperaturas médias (80 °C a 120 °C) para o ramo de fabricação de produtos alimentícios e bebidas, que estão localizados nas regiões andinas, especialmente nas províncias de Pichincha, Imbabura e Loja.

## 2.6 SISTEMA HÍDRIDOS

Para a viabilidade de geração de energia térmica em sistema CSP, as condições meteorológicas são fundamentais, uma vez que depende diretamente das condições atmosféricas, como variação da massa de ar<sup>2</sup>, cobertura de nuvens, além de considerar que cada região tem fatores diferenciados (CASTRO, 2016). Por ser variável a geração de energia solar durante o dia, Tilahun *et al.* (2021), relatam que a implantação de uma usina solar se torna pouco atrativa se comparada a usinas convencionais.

Entretanto, um dos estímulos para o uso de novas fontes de energia renováveis é a atual instabilidade no preço do petróleo mundialmente. Nesse contexto, a energia solar aos poucos vem ganhando espaço para geração de calor e energia elétrica nas fábricas, podendo ser interligada a plantas novas ou adaptando as existentes (gás natural, diesel, entre outros), de forma híbrida.

---

<sup>2</sup> Massa de ar é definida como volumes do ar atmosférico que adquirem as características físicas dos locais que se formam, sendo a temperatura (quentes ou frias) e umidade (continentais ou marítimas) (MASSAS DE AR, 2022).

O projeto de planta híbrida consiste em combinar o recurso solar a outra fonte de energia, para gerar a energia térmica, aumentando a eficiência do processo, oferecendo maior segurança no suprimento, redução de custos e prolongamento das horas de operação (SRINIVAS; REDDY, 2014). Além disso, as opções de hibridização da tecnologia CSP com diversas fontes de energia são abundantes, desde aquecimento de água de alimentação, vapor de reaquecimento, vapor superaquecimento (PETERSEIM *et al.*, 2013).

Ainda, Almeida (2018) aponta que a hibridização ao ser implementada com o compartilhamento da infraestrutura comum pode viabilizar a redução de custos gerados pelo campo solar. Além disso, se a energia solar é empregada para a redução no consumo de combustível durante as horas de sol, existe a possibilidade de fornecer a carga demandada sem a implementação de sistemas de armazenamento térmico.

Peterseim *et al.* (2013), ao estudarem plantas que usam madeira, resíduos de construção e demolição (C&D), *refuse-derived fuel* (RDF)<sup>3</sup> e *Municipal solid waste* (MSW), e que são operadas por coletores Fresnel para fornecimento de vapor superaquecido de 400 a 450 °C para a turbina conjunta, apresentaram pontuações quanto o uso de sistemas CSP, descrevendo que esses concentradores para esta aplicação são os recomendados, por consumir menor quantidade de água de limpeza dos painéis de espelho plano, e por ter campo solar compacto, o que reduz o tamanho das áreas de instalação.

Desta forma, a hibridização de usinas solares vem ganhando espaço, e acordo com Soares *et al.* (2018), há vários estudos que avaliam a combinação de tecnologias híbridas (CSP e biomassa, entre outras), contudo em sua maioria para geração de energia elétrica. Almeida (2018) explana que nos últimos anos, a pesquisa quanto à hibridização de sistemas, como a de biomassa com concentradores Fresnel reflete de modo positivo a geração de vapor até temperaturas de 500 °C e, consecutivamente, melhores eficiências de conversão.

---

<sup>3</sup> É um conceito sobre combustíveis não-naturais, e a Comissão Europeia de Normalização (CEN) deu a RDF o nome de SRF (combustível recuperado sólido). Uma de suas aplicações é a queima em uma caldeira especial e usado como fonte de calor na secagem e na desinfecção térmica (ENCKE, 2019).

No Brasil, há um projeto instalado em laboratório, para geração de energia elétrica de forma híbrida, solar – biomassa (Figura 13), realizado de 2011 a 2016 entre o grupo energético Companhia Paulista de Força e Luz (CPFL) e da Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), no qual a planta construída faz uso de disco parabólico operando com ciclo Rankine orgânico, combinado com um sistema de gaseificação de biomassa e motores de combustão interna. A geração de energia elétrica pelos discos foram de 5,6 kW<sub>e</sub> e o sistema de gaseificação/motor gerou 6,75 kW<sub>e</sub> (CPFL, 2021).

**Figura 13:** Planta Solar/biomassa que utiliza sistemas CSP



**Fonte:** CPFL (2021); (a) Laboratório Solar; (b) Concentradores Solares

## 2.7 CUSTOS RELACIONADOS À GERAÇÃO DE VAPOR DE PROCESSO

Aspectos econômicos das usinas CSP têm sido objeto de vários estudos de pesquisa, assim demonstrando que a busca pela transição dos combustíveis fósseis para energias renováveis tornou-se uma necessidade. Além disso, Baba *et al.* (2020) apresentam que dentre as tecnologias CSP o refletor linear Fresnel é considerado interessante em processos industriais, utilizando calor em média temperatura. Os resultados do estudo mostraram que concentrador linear Fresnel pode ser uma alternativa às caldeiras existentes no mercado, no qual o período de retorno é condicionado pelo nível de DNI, variando de 2 a 9 anos.

Ainda, Gabbrielli *et al.* (2013) conduziu estudo sobre o custo nivelado de calor produzido por meio da tecnologia de concentradores Fresnel linear de pequena escala, no qual calculou-se o LCOH de Fresnel e o comparou ao gás natural. À vista disso concluíram que o calor de processo industrial de Fresnel pode competir com o GN, mesmo quando se está no cenário real de baixo preço

do GN e sem qualquer subsídio do governo, obtendo um custo específico inferior a 150 €/m<sup>2</sup> em locais que o DNI anual é superior a 1900 kWh/m<sup>2</sup>-ano.

Kurup e Turchi (2015), destacam que o estudo de caso de uma cervejaria no sul da Europa, que consome aproximadamente 4,5 milhões de m<sup>3</sup> de gás natural por ano, ao integrar o sistema de concentradores parabólicos para fornecer energia térmica significativa para as caldeiras a gás (que produzem vapor a 8 bar e 170 °C), economizou US\$ 0,59 milhão por ano, com *payback* simples estimado em sete anos.

O estudo realizado por Cortés *et al.* (2018) no setor industrial chileno que atua na faixa de temperatura de 140 a 200 °C e pressão de 3 a 6 bar, utilizando concentradores de calha parabólica, mostra que para gerar vapor saturado houve parâmetros críticos que afetaram o LCOH, como a temperatura de saída do processo. Todavia, na Região do Atacama, o LCOH médio foi de 21,84 US\$/MWh<sub>th</sub>, enquanto a região central obteve um LCOH inferior a 33 US\$/MWh<sub>th</sub>, e no sul do país o LCOH médio foi de 36 US\$/MWh<sub>th</sub>. Os resultados econômicos apresentados têm condições favoráveis para a integração da energia solar térmica em processos industriais no Chile, porém se faz necessário reduzir os preços dos coletores e verificar as incertezas quanto aos custos de instalações.

López (2021) ao abordar o mercado SHIP em seu estudo apresentou como resultados que há cinco países com maior potencial de instalação, sendo Alemanha, França, Holanda, Itália e Espanha, enquanto os setores com maior potencial de mercado são alimentos e bebidas e químico, em que se levou em consideração as limitações como a competitividade com outras fontes de calor renováveis, o potencial de recuperação de calor esperado, a fração solar e a disponibilidade de espaço no telhado nas fábricas.

Além disso, López (2021) ao fazer a análise de sensibilidade de uma planta de geração direta de vapor com concentradores Fresnel, localizada em Sevilha, na Espanha, observou que em locais com radiação acima de 1750 kWh/m<sup>2</sup> têm-se valores positivos para VPL e acima de 2250 kWh/m<sup>2</sup> o custo de geração de aquecimento solar está abaixo dos preços europeus do gás natural (preços do GN na Europa considerados entre 30 e 50 €/MWh). Ainda, ao fazer a análise utilizando o CAPEX mostram que o LCOH atinge o valor de 40,5 €/MWh,

no qual se torna mais competitivo se comparado as faixas de preços estabelecida para o GN.

Middelhoff *et al.* (2022) apresentam uma pesquisa quanto a viabilidade técnica e econômica de um sistema híbrido de biomassa solar concentrada (*Hybrid concentrated solar biomass* - HCSB) para um abatedouro de carne bovina na Austrália. As opções de projetos apresentadas são um sistema orgânico de ciclo Rankine (ORC) integrado a tecnologia de calhas parabólicas e uma caldeira de biomassa existente, obtendo um LCOH que varia de 47,5 a 78 AU\$/MWh<sub>th</sub> (32,75 a 53,78 US\$/MWh<sub>th</sub>). A segunda alternativa é uma unidade solar térmica (calhas parabólicas) e sistema de superaquecimento a biogás (sistema *Hybrid combined cycle* - HCC), se mostrando como a solução mais econômica, por fornecer calor 100% renovável, e com LCOH variando de 48,9 a 78,7 AU\$/MWh<sub>th</sub> (33,72 a 54,27 US\$/MWh<sub>th</sub>).

No Brasil, o estudo quanto a viabilidade de se utilizar concentradores de calha parabólicos para geração de vapor de processo na indústria, a fim de reduzir o consumo de gás natural, teve como resultados do LCOH para o GN variando de 43 a 58 US\$/MWh<sub>th</sub>, e LCOH híbrido (GN – Solar térmica) com valores de 45 a 59 US\$/MWh<sub>th</sub>. Assim, demonstrando que há um potencial para instalação da tecnologia CSP, principalmente se for considerada a perspectiva de reduzir os custos de implantação e O&M (BURIN, *et al.*, 2020).

Apesar de serem apresentados diversos estudos quanto aos pellets, ainda há uma ausência quanto a custos da geração de calor e energia elétrica. No estudo de Gonçalves (2015), referente a produção de energia elétrica com potência de 20MW, no qual um sistema utiliza torre central térmica solar com *backup* a biomassa (pellets), localizada na região de Alentejo, Portugal, o resultado obtido demonstra que energia gerada para venda tem um preço de mercado de 0,04764 €/kWh, sendo uma tecnologia CSP economicamente inviável. Entretanto, são encontrados estudo como o de Pereira (2017) que evidencia os preços médio dos pellets, que podem variar de 128,5 US\$/t (Indonésia) a 276,4 US\$/t (Eslovênia), tendo como base o ano de 2015.

Para tanto, a Tabela 2, mostra de forma sucinta os estudos referentes a tecnologia CSP para geração de vapor, e resultados encontrados.

**Tabela 2** – Estudos quanto a tecnologia CSP e seus custos para geração de vapor

Autores	Ano do estudo	Tecnologia CSP	Resultados do estudo
Baba <i>et al.</i>	2020	Fresnel	2 a 9 anos (período retorno investimento)
Gabbrielli <i>et al.</i>	2013	Fresnel	150 €/m <sup>2</sup> (DNI anual superior a 1900 kWh/m <sup>2</sup> -ano)
Kurup e Turchi	2015	Calha parabólica	7 anos ( <i>payback</i> simples)
Cortés <i>et al.</i>	2018	Calha parabólica	LCOH: 21,84 a 36 US\$/MWh <sub>th</sub>
López	2021	Fresnel	LCOH: 40,5 €/MWh
Middelhoff <i>et al.</i>	2022	Calha parabólica	LCOH: - 47,5 a 78 AU\$/MWh <sub>th</sub> ( <i>Hybrid combined cycle</i> ) e 48,9 a 78,7 AU\$/MWh <sub>th</sub> ( <i>Hybrid concentrated solar biomass</i> )
BURIN <i>et al.</i>	2020	Calha parabólica	LCOH: 45 a 59 US\$/MWh <sub>th</sub>
Gonçalves	2015	Torre Central	0,04764 €/kWh (custo energia elétrica)

FONTE: Autoria Própria (2022)

Ademais, a Tabela 3, mostra alguns estudos relativos ao LCOH de diferentes fontes de energia.

**Tabela 3** – Estudos quanto ao custo do LCOH

Autores	Ano do estudo	Fonte	LCOH (Resultados do estudo)
Fan <i>et al.</i>	2022	Hidrogênio Processo C <sub>2</sub> HCCS de baixo carbono	1,90 a 2,81 US\$/kg
		Processo C <sub>2</sub> H	1,05 a 1,46 US\$/kg
Siqueira Neto	2018	Cavaco de eucalipto	74,62 R\$/MWh <sub>th</sub>
Paes	2017	Tubos evacuados	2,52 a 3,38 US\$/kWh <sub>th</sub>
		Tubos com ar	5,95 a 11,67 US\$/kWh <sub>th</sub>

FONTE: Autoria Própria (2022)

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

Neste capítulo apresenta-se a metodologia desenvolvida e a abordagem selecionada para realizar este estudo.

#### Visão geral da metodologia

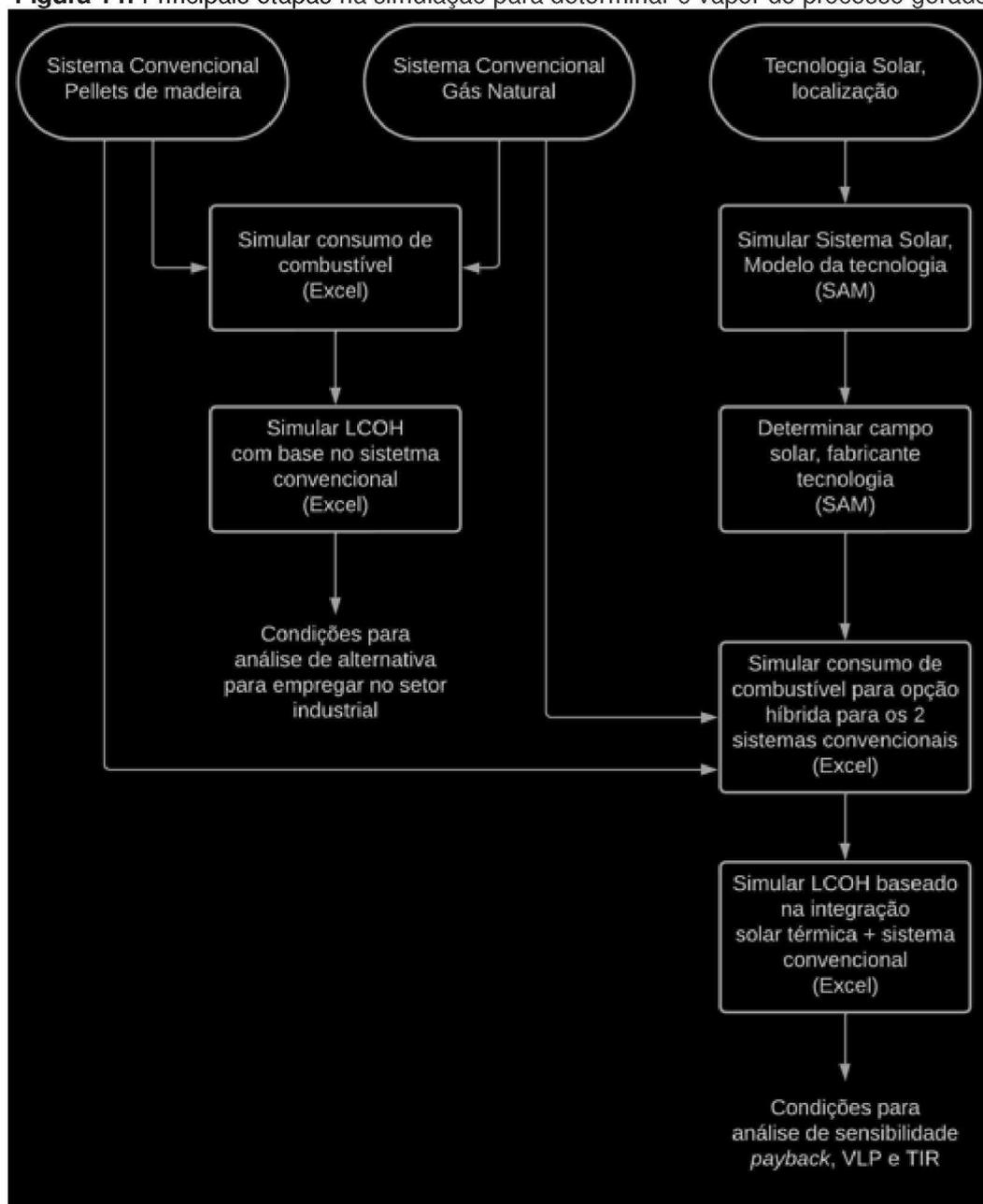
O desenvolvimento do trabalho se dá pelo conceito de sistemas baseados no uso de caldeira a gás natural e a biomassa, bem como sistemas híbridos. Para tanto avaliou-se quatro configurações de plantas para geração de vapor de processo na indústria, apresentando os seguintes cenários (Figura 14):

- Cenário A: unidade geradora de vapor a gás natural;
- Cenário B: unidade geradora de vapor que utiliza pellets de madeira como combustível;
- Cenário C: planta híbrida caracterizada pela integração em paralelo de concentradores Fresnel e unidade geradora de vapor a gás natural;
- Cenário D: planta híbrida caracterizada pela integração em paralelo de concentradores Fresnel e unidade geradora de vapor que faz uso dos pellets de madeira.

As premissas técnicas adotadas para o projeto e as simulações da planta são:

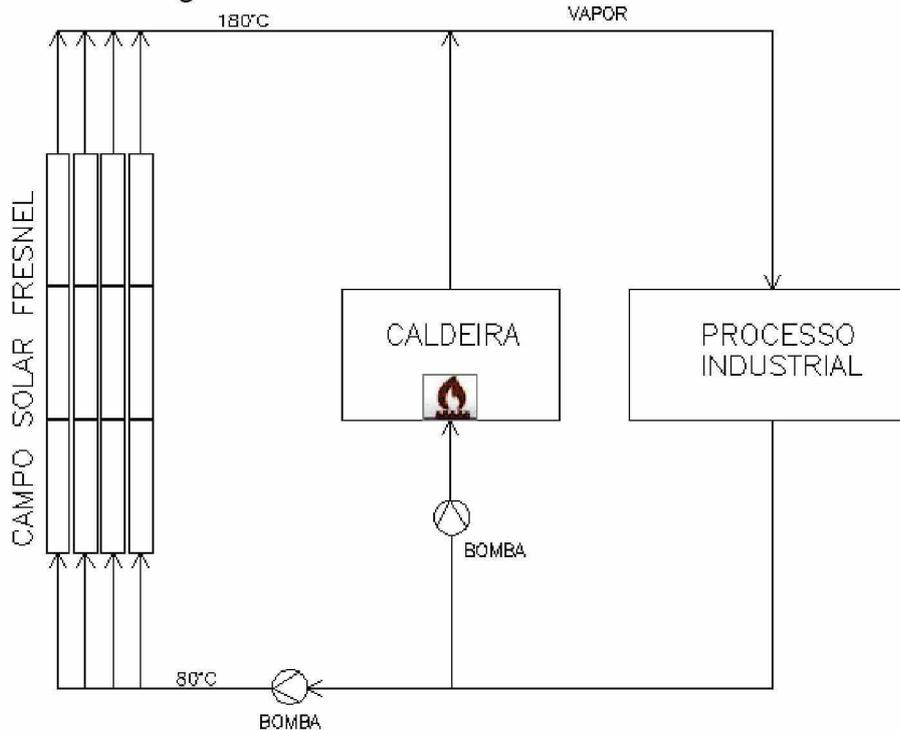
- Demanda de vapor de processo na indústria: 10 t/h de vapor saturado ( $x=1$ ) a 10 bar absoluto (temperatura de saída da água é de 180 °C), 24h/dia, sete dias por semana e 365 dias por ano;
- Eficiência térmica da unidade geradora de vapor a gás natural de 90%, modelo A3P-10 (ALFA LAVAL, 2022);
- Eficiência térmica de 80% para caldeira que utiliza pellets de madeira como combustível, modelo LHC-10 (ALFA LAVAL, 2022);
- Poder Calorífico Inferior (PCI) do gás natural igual a 8364 kJ/N.m<sup>3</sup> (GASBRASILIANO, [201-]);
- PCI do pellet de madeira, adotou-se a média com o valor de 17,62 MJ kg<sup>-1</sup>, (umidade de 10%), descrito na pesquisa de Garcia (2010).

**Figura 14:** Principais etapas na simulação para determinar o vapor de processo gerado



FONTE: Autoria Própria (2022)

O estudo se dá por meio da representação esquemática do sistema que contempla o campo Fresnel, sem armazenamento, operando em paralelo com a unidade geradora de vapor, mostrado na Figura 15.

**Figura 15:** Modelo do sistema híbrido estudado

FONTE: Autoria Própria (2022)

### 3.1 LOCAIS DE ESTUDO E PREÇOS DOS COMBUSTÍVEIS

A pesquisa foi desenvolvida considerando-se a instalação da planta industrial em cidades em que ocorre o fornecimento do gás natural, sendo elas: Campo Grande, São Paulo, Belo Horizonte, Curitiba, Florianópolis, Recife e Fortaleza. As simulações foram realizadas considerando-se séries de dados TMY (anos meteorológicos típicos) obtidos da plataforma *Solar and Wind Energy Resource Assessment (SWERA)*. No caso do Brasil, o gás natural para uso industrial, tem faixas de preços distintas (Anexo A), conforme concessionária de cada região estudada (Tabela 4).

**Tabela 4** – DNI médio e concessionária de GN, por cidade estudada

Cidade, Estado	DNI (kWh/m <sup>2</sup> -ano)	Referência de custo do GN
Curitiba, PR	1347,4	Compagas
Florianópolis, SC	1424,0	Scgas
Campo Grande, MS	1879,0	Msgas
São Paulo, SP	1464,5	Comgas
Belo Horizonte, MG	1742,2	Gasmig
Recife, PE	1735,6	Copergás
Fortaleza, CE	1986,4	Cegas

FONTE: Autoria Própria (2022)

O estudo considera reduzir o consumo do gás natural para produção de vapor saturado no setor industrial brasileiro. Para tanto, os indicadores adotados para elaborar a análise do consumo de gás natural tiveram como referência o valor do metro cúbico consumido (mês de janeiro de 2022) que é aplicado nas distribuidoras de cada região estudada.

Para determinar o custo dos pellets de madeira empregados na produção de vapor saturado, foram realizadas cotações diretamente com os fabricantes, resultando nos preços médios que variaram de 642,00 a 1073,33 reais por tonelada (R\$/t), aplicado para as cidades de Curitiba, Florianópolis, São Paulo e Recife. Para as demais cidades (Campo Grande, Belo Horizonte e Fortaleza) adotou-se o maior valor descrito por Garcia *et al.* (2017), sendo 600 R\$/t para pellets retirados diretamente na fábrica (Tabela 5).

**Tabela 5** – Preço médio dos pellets de madeira, por cidade estudada

Cidade, Estado	Cotação pellets (R\$/t - FOB)
Curitiba, PR <sup>2</sup>	663,33
Florianópolis, SC <sup>2</sup>	642,00
Campo Grande, MS <sup>1</sup>	600,00
São Paulo, SP <sup>2</sup>	1.073,33
Belo Horizonte, MG <sup>1</sup>	600,00
Recife, PB <sup>2</sup>	857,34
Fortaleza, CE <sup>1</sup>	600,00

FONTE: <sup>1</sup> GARCIA *et al.* (2017); <sup>2</sup> Cotação

### 3.2 MODELAGEM DO CAMPO FRESNEL

A tecnologia CSP proposta para a hibridização é a de concentradores Fresnel sem armazenamento térmico que promovem a geração direta de vapor – ou seja, não é empregado um fluido de trabalho secundário. A escolha do sistema Fresnel é justificada pelo fato dessa ser uma tecnologia encontrada comercialmente, podendo operar a temperaturas de até 450 °C (MORIN *et al.*, 2011), ser capaz de operar com pressões de até 120 bar, com água, óleo térmico ou glicol de alta temperatura, por possibilitar a geração direta vapor, e, por ter um design modular podendo ser ampliado de 500 kW a 30 MW.

Ainda, suas vantagens são baixa carga de vento, baixo custo operacional e peso, alta eficiência de ocupação de terreno, integração simples,

longa vida útil e tem como opção a limpeza automática (INDUSTRIAL SOLAR, 2021).

Além disso, devido à limpeza robótica dos painéis de espelhos planos, o sistema Fresnel necessita de baixa quantidade de água de limpeza, comparada a todas as tecnologias CSP (PETERSEIM *et al.*, 2013).

As simulações foram realizadas utilizando-se o módulo *Linear Fresnel Direct Steam/IPH Linear* do software *System Advisor Model* (SAM, versão 2020.2.29), que é um software livre desenvolvido pelo *National Renewable Energy Laboratory* (NREL), tomando-se como base os dados do módulo *Fresnel Collector LF-11* fornecidos pelo fabricante do equipamento (INDUSTRIAL SOLAR, 2021), mostrados na tabela 6.

**Tabela 6** – Dados gerais do módulo básico (*Fresnel Collector LF-11*)

Descrição	Unidade	Valor
Largura	m	7,5
Comprimento	m	4,06
Área dos refletores primários	m <sup>2</sup>	23
Área terreno (um único módulo)	m <sup>2</sup>	30,45
Altura do refletor primário acima do nível do solo	m	4,5
Espaço mínimo entre filas paralelas	m	0,2
Velocidade máxima do vento operacional	m/s	27,78

FONTE: Adaptado da Industrial Solar (2021)

Na Tabela 7, por sua vez, são mostradas as premissas adotadas para o dimensionamento do campo solar. Como pode ser observado, dimensionou-se o campo solar para fornecer 3,4 MW<sub>th</sub> (equivalente a 5 t/h de vapor saturado). Nessa condição, o campo solar fornece 50% da vazão mássica de vapor demandada pela indústria, condição estabelecida considerando que a carga mínima de operação das caldeiras deve estar limitada a 50%, com isso, evitando problemas operacionais, emissões de gases acima do estabelecido em legislação, bem como redução significativa da sua eficiência térmica.

Ainda, se torna importante atentar-se ao múltiplo solar (MS)<sup>4</sup> do campo de concentradores, definido em 1,2. Ou seja, apresenta área 20% maior do que aquela definida na condição de projeto, visando aumentar o número de horas no

<sup>4</sup> De acordo com Kami (2019) em plantas CSP o MS deve ser maior que 1, de modo que a planta opere por maior tempo possível nas condições nominais.

ano em que o sistema poderá fornecer a carga térmica de projeto de 3,4MW<sub>th</sub> (valor tipicamente empregado para sistemas sem armazenamento térmico).

**Tabela 7 – Parâmetros adicionados no SAM para *System Design* e *Solar Field***

Parâmetro	Unidade	Valor
Temperatura da água na entrada do campo solar (condensado)	°C	80
DNI* na condição de projeto	W/m <sup>2</sup>	900
Capacidade do campo solar	MW <sub>th</sub>	3,4
Temperatura ambiente na condição de projeto	°C	30
Multiplicador solar	-	20% (MS=1,2)

FONTE: Autoria Própria (2022); \* Adaptado da Industrial Solar (2021)

A razão entre a energia térmica produzida pelo campo solar ao longo de um ano e a energia térmica requerida pelo processo industrial no mesmo período é a fração solar, calculada conforme Equações 1 e 2.

$$F_{Sgn} = \left(1 - \frac{Q_{gn.h}}{Q_{gn.b}}\right) * 100 \quad (1)$$

$$F_{Sp} = \left(1 - \frac{m_{p.h}}{m_{p.b}}\right) * 100 \quad (2)$$

Onde:

$F_{Sgn}$  [%] fração solar anual para o sistema híbrido (GN-Solar térmico);

$F_{Sp}$  [%] fração solar anual para o sistema híbrido (Pellets de madeira-Solar térmico);

$Q_{gn.b}$  [m<sup>3</sup>/ano] representa o consumo de gás natural, no qual  $b$  indica o consumo do sistema base;

$Q_{gn.h}$  [m<sup>3</sup>/ano] representa o consumo de gás natural, no qual  $h$  indica o consumo da planta híbrida

$m_{p.b}$  [t/ano] consumo de biomassa (pellets de madeira), no qual  $b$  indica o consumo da caldeira a pellets de madeira.

$m_{p.h}$  [t/ano] consumo de biomassa (pellets de madeira), no qual  $h$  indica o consumo do sistema híbrido.

Em relação ao desempenho óptico do campo solar, a eficiência óptica máxima para os refletores primários e secundários 100% limpos e para o Sol no zênite foi definida em  $\eta_0 = 0,686$ , conforme indicado no *datasheet* do equipamento. Além disso, considerou-se 5% de perdas associadas com a

deposição de sujeira/poeira nos espelhos (INDUSTRIAL SOLAR, 2021). Nesse contexto, a eficiência óptica do arranjo em função do ângulo de incidência foi calculada através da Equação 3.

$$\eta_{opt} = \eta_0 \cdot IAM_l \cdot IAM_t \cdot F_{sm} \quad (3)$$

Onde:

$\eta_{opt}$  representa a eficiência óptica dos módulos;

$IAM_l$  e  $IAM_t$  são modificadores dos ângulos de incidência calculados em função dos ângulos  $\theta_l$  e  $\theta_t$  [graus]<sup>5</sup>, respectivamente (ANEXO B);

$F_{sm}$  é o parâmetro que representa a redução da eficiência óptica do sistema em decorrência da deposição de poeira ( $F_{sm}=0,95$ ).

Quanto aos aspectos relacionados com a perda de calor nos receptores, adotou-se a opção *Polynomial heat loss model* no SAM, no qual foram inseridos os dados do fabricante:  $c1 = 0,032913 \text{ W/m}^2 \text{ K}$  e  $c4 = 1,4838 \times 10^{-9} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$  (INDUSTRIAL SOLAR, 2021).

### 3.3 MODELAGEM DAS UNIDADES GERADORAS DE VAPOR

Calculou-se o consumo horário de combustível utilizando a ferramenta *Excel* considerando que a caldeira (a gás natural no caso dos cenários A e B; ou a biomassa no caso dos cenários C e D) deve produzir a vazão de vapor necessária para a todo momento atender a demanda de vapor do processo industrial. Nesse contexto, foram empregadas as Equações 4 e 5 para todos cenários,

$$\eta_{gv,gn} = \frac{\dot{m}_v(h_v - h_c)}{Q_{gn} PCI_{gn}} \quad (4)$$

$$\eta_{gv,p} = \frac{\dot{m}_v(h_v - h_c)}{\dot{m}_p PCI_p} \quad (5)$$

Onde:

---

<sup>5</sup>  $\theta_l$  (ângulo de incidência longitudinal) formado entre o zênite e a projeção do vetor solar no plano longitudinal, e  $\theta_t$  (ângulo de incidência transversal) formado entre o zênite e a projeção do vetor solar no plano transversal (ALMEIDA, 2018).

$\eta_{gv,gn}$  [-] representa a eficiência térmica da unidade geradora de vapor a gás natural;

$\eta_{gv,p}$  [-] representa a eficiência térmica da unidade geradora de vapor a biomassa (pellets de madeira);

$\dot{m}_v$  [kg/h] é a vazão de vapor saturado gerado pelas unidades;

$h_v$  [kJ/kg] é a entalpia do vapor saturado;

$h_c$  [kJ/kg] é a entalpia da água de alimentação das unidades (condensado);

$Q_{gn}$  [Nm<sup>3</sup>/h] é o consumo de gás natural;

$\dot{m}_p$  [kg/h] é o consumo de pellets de madeira;

$PCI_{gn}$  [kJ/Nm<sup>3</sup>] é o poder calorífico inferior do gás natural;

$PCI_p$  [kJ/kg] é o poder calorífico inferior da biomassa (pellets de madeira).

A quantidade de combustível economizado por ano em decorrência da operação híbrida, por sua vez, foi calculada pelas Equações 6 e 7 para o cenário C (gás natural) e para o cenário D (pellets de madeira), respectivamente,

$$EF_{gn} = \sum_{ano}(Q_{gn.b} - Q_{gn.h}) \quad (6)$$

$$EF_p = \sum_{ano}(\dot{m}_{p.b} - \dot{m}_{p.h}) \quad (7)$$

Onde:

$EF_{gn}$  [m<sup>3</sup>/ano] representa a economia do combustível (gás natural);

$EF_p$  [t/ano] representa a economia do combustível (pellets de madeira);

$Q_{gn.b}$  e  $Q_{gn.h}$  [m<sup>3</sup>/ano] consumo de gás natural, no qual  $b$  e  $h$  são os sub-índices que indicam o consumo da caldeira a gás natural e da planta híbrida, respectivamente;

$\dot{m}_{p.b}$  e  $\dot{m}_{p.h}$  consumo de biomassa (pellets de madeira), no qual  $b$  e  $h$  são os sub-índices que indicam o consumo da unidade geradora de vapor a pellets de madeira e da planta híbrida, respectivamente.

Por fim, a eficiência térmica dos sistemas híbridos de geração vapor foi calculada conforme Srinivas e Reddy (2014), Equação 8,

$$\eta_s = \frac{Q_T}{\dot{m}_c \times PCI + DNI_T \times A_{cs}} \quad (8)$$

Onde:

$Q_T$  [kWh/ano] representa a energia útil gerada pela caldeira e pelo campo solar;  
 $\dot{m}_c$  [ $\text{Nm}^3/\text{ano}$  para GN e  $\text{t/ano}$  para pellets de madeira] é a quantidade de combustível consumida pela caldeira;

$\text{DNI}_T$  representa a radiação normal direta anual [ $\text{kWh}/\text{m}^2 \text{ ano}$ ];

$A_{cs}$  é a área de espelhos [ $\text{m}^2$ ].

Em se tratando das unidades a gás natural ou pellets de madeira (não híbridas), os termos  $\text{DNI}_T$  e  $A_{cs}$  são iguais a zero e as eficiências correspondem às eficiências das caldeiras a gás ou a biomassa (pellets de madeira).

### 3.4 ANÁLISE ECONÔMICA

O custo do vapor de processo industrial para cada planta foi quantificado por meio do *Levelized Cost of Heat* (LCOH - custo nivelado do calor), apresentado na Equação 9. Segundo Nian *et al.* (2016), o LCOH tem como objetivo avaliar o custo da produção de energia térmica, sendo análogo ao parâmetro *Levelized Cost of Energy* (LCOE) comumente empregado para representar o custo da energia elétrica gerada em sistemas de geração de energia.

$$LCOH = \frac{\sum_{t=0}^n (CAPEX_t + OPEX_t + C_t) (1+r)^{-t}}{\sum_{t=0}^n (H_t) (1+r)^{-t}} \quad (9)$$

Onde:

$CAPEX_t$  e  $OPEX_t$  [R\$] são os custos de investimento, operação e manutenção e combustível;

$C_t$  [R\$/ano] as despesas anuais relacionadas à compra de combustível;

$t$  [anos] o tempo de vida da planta;

$H_t$  [MWh] é a energia térmica produzida,

$r$  [%] a taxa de desconto.

As premissas adotadas em relação ao *Capital Expenditure* (CAPEX) e *Operational Expenditure* (OPEX) do campo solar e caldeiras, estão representadas na Tabela 8. A taxa mínima de atratividade do investimento foi fixada em 10% (estabelece um limite para os investidores), OPEX de 1% do

custo de investimento, e a vida útil da planta de 25 anos (conforme especificação do fabricante).

**Tabela 8** – Premissas adotadas para análise de custos do vapor dos sistemas.

	Parâmetro	Unidade	Valor
Campo solar	CAPEX <sup>1</sup>	R\$	16.063.525,00
	OPEX	R\$/ano	1% do CAPEX
Caldeira (gás natural)	CAPEX <sup>1</sup>	R\$	1.550.000,00
	OPEX	R\$/ano	1% do CAPEX
Caldeira (pellets de madeira)	CAPEX <sup>1</sup>	R\$	3.800.000,00
	OPEX	R\$/ano	1% do CAPEX
Premissas econômicas	TMA <sup>2</sup>	%	10
	Tempo de vida útil <sup>3</sup>	Anos	25

Fonte: Autoria Própria (2022) <sup>1</sup>Cotação; <sup>2</sup>Siqueira Neto (2018); <sup>3</sup>Industrial Solar (2021)

O custo do sistema Fresnel foi cotado em 2,5 milhões de Euros. Para determinar o CAPEX em reais considerou-se a média do valor do Euro referente ao mês de outubro de 2021 (BCB, 2021). Para o OPEX dos cenários estudados, foram incluídos os custos de operação e manutenções preventivas e corretivas anuais dos equipamentos, tais como a caldeira e o campo solar. A cotação das caldeiras a gás natural e biomassa de madeira (pellets) foram dadas na moeda corrente no Brasil (Reais).

O LCOH calculado atende a todos os cenários estudados (A a D). Com relação às plantas híbridas (cenários C e D), por sua vez, realizou-se a análise da viabilidade da integração do campo solar com as plantas convencionais (processo de hibridização), considerando-se que o investimento do campo solar deve ser pago pela receita originada com a economia de combustível. Nesses casos, foram calculados também os indicadores Valor Presente Líquido (VPL, Equação 10), a Taxa Interna de Retorno (TIR, Equação 11), e o tempo de retorno do investimento (*payback*) descontado.

$$VPI = \sum_{t=0}^n FC (1 + TMA)^{-t} \quad (10)$$

$$VPL = \sum_{t=0}^n FC (1 + TMA)^{-t} \quad (11)$$

$$0 = VPL = \sum_{t=0}^n \frac{FC}{(1+TIR)^t}$$

Onde:

FC [R\$] é o fluxo de caixa a valor presente,

t [ano] é o enésimo período no tempo;

n [anos] representa o número de períodos;

TMA é a taxa mínima atrativa do investimento;

TIR é a taxa de desconto que zera a VPL, devendo a TIR ser maior que a TMA para que o projeto possa ser considerado economicamente viável.

O estudo considera o *payback* descontado, no qual os benefícios são somados já descontados a uma taxa de desconto igual à TMA. Dessa forma, é representado o tempo necessário para que os benefícios gerados pelo projeto possam compensar o investimento realizado. Por fim, verificar o retorno do investimento e os custos dos combustíveis estudados, a fim de apresentar uma alternativa que venha reduzir o consumo de combustível fóssil dentre os cenários estudados.

Ademais, apresenta-se a análise de sensibilidade que é feita para estimar os limites técnico-econômicos para a integração da tecnologia Fresnel aos sistemas de unidades geradoras a gás natural e pellets de madeira, ou seja, parâmetros que afetam o custo para geração do vapor de processo. Portanto, avaliar as condições favoráveis para integrar a tecnologia CSP e os indicadores. Para os parâmetros do preço do campo solar e custo dos combustíveis *versus* o *payback* descontado, adotou-se o tempo de retorno do investimento esperado deve ser menor que 5 anos (ALMEIDA, 2018).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo descreve os resultados alcançados após a simulação dos sistemas que utilizam caldeias a gás natural e pellets de madeira, bem como, a hibridização desses sistemas com a tecnologia Fresnel para geração direta de vapor de processo.

### 4.1 PLANTAS A GÁS NATURAL E PELLETS DE MADEIRA

Os resultados referentes à geração de vapor de processo empregando-se o gás natural como combustível (cenário A) para as diferentes cidades estudadas são apresentados na Tabela 8. A Tabela 9 mostra os resultados referentes à geração de vapor saturado utilizando pellets de madeira como combustível (cenário B).

**Tabela 9** – Resultados relativos ao estudo do consumo de GN

Cidades	Recife - PE	Fortaleza - CE	Campo Grande - MS	São Paulo - SP	Belo Horizonte - MG	Curitiba - PR	Florianópolis - SC
<b>Consumo de GN (10<sup>3</sup> Nm<sup>3</sup>/ano)</b>	6.782,83	6.782,83	6.782,83	6.782,83	6.782,83	6.782,83	6.782,83
<b>Custos relacionados com a compra do GN (10<sup>3</sup> R\$/ano)</b>	186.999,82	225.842,65	210.917,80	278.941,73	190.350,78	233.215,11	221.751,81
<b>Custo médio específico do GN (R\$/Nm<sup>3</sup>)</b>	3,04	3,67	3,42	4,53	3,09	3,79	3,60
<b>LCOH (R\$/MWh<sub>th</sub>)</b>	252,69	305,18	285,01	376,93	257,22	315,14	299,65
<b>LCOH (US\$/MWh<sub>th</sub>)*</b>	45,61	55,09	51,45	68,05	46,43	56,89	54,09

FONTE: Autoria Própria (2022); \* 1 dólar = 5,54 reais (média referente ao mês de outubro de 2021 (BCB, 2021)).

**Tabela 10** – Resultados relativos ao estudo do consumo de pellets de madeira

Cidades	Recife – PE	Fortaleza - CE	Campo Grande - MS	São Paulo - SP	Belo Horizonte - MG	Curitiba - PR	Florianópolis - SC
<b>Consumo de pellets (t/ano)</b>	15.177,00	15.177,00	15.177,00	15.177,00	15.177,00	15.177,00	15.177,00
<b>Custos relacionados com a compra de pellets (10<sup>3</sup> R\$/ano)</b>	14.767,57	9.106,20	9.106,20	16.289,98	9.106,19	10.067,41	9.743,63
<b>Custo médio dos pellets (R\$/t)</b>	973,02	600,00	600,00	1.073,33	600,00	663,33	642,00
<b>LCOH (R\$/MWh<sub>th</sub>)</b>	181,60	112,16	112,16	200,27	112,16	123,95	119,98
<b>LCOH (US\$/MWh<sub>th</sub>)*</b>	32,78	20,25	20,25	36,15	20,25	22,38	21,66

FONTE: Autoria Própria (2022); \* 1 dólar = 5,54 reais (média referente ao mês de outubro de 2021 (BCB, 2021)).

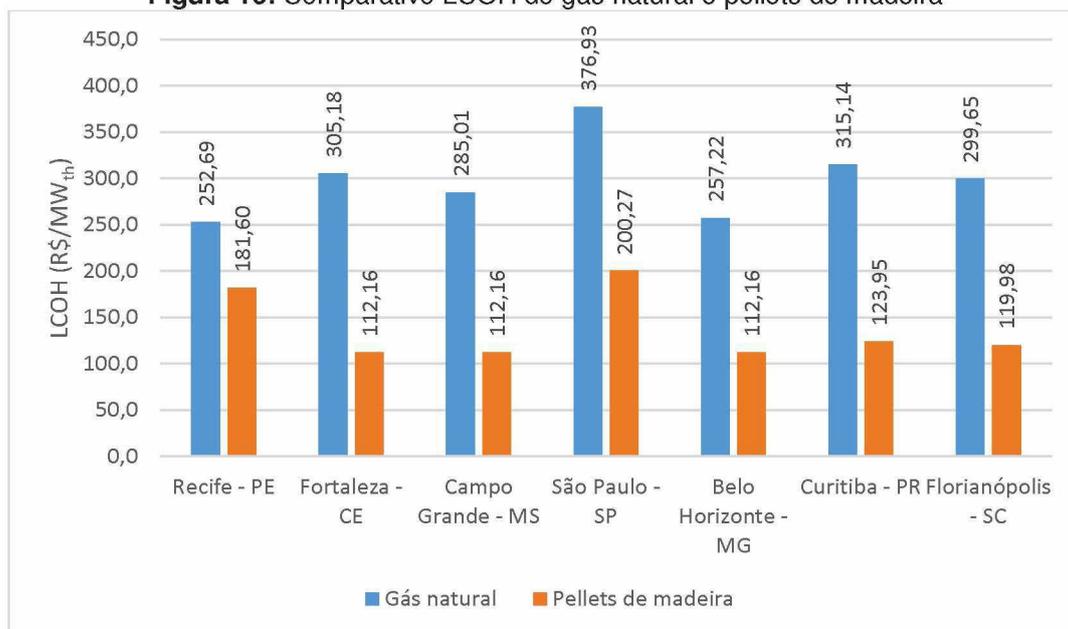
Ao analisar o LCOH para as caldeiras que utilizam combustível fóssil ou renovável para gerar vapor de processo, nota-se que, apesar de ter um valor de investimento inicial elevado, a caldeira a pellets de madeira apresenta-se como uma alternativa viável para substituir as caldeiras a GN.

Além disso, mundialmente há uma variação no preço do gás natural que atende o setor industrial. O Brasil possui um LCOH de GN elevado se comparado aos Estados Unidos (10,86 US\$/MWh) e Canadá (9,87 US\$/MWh). No entanto, tem valores aproximados ao de alguns países europeus, como a Suíça e Irlanda, sendo 64,94 US\$/MWh e 43,38 US\$/MWh de gás natural, respectivamente (STATISTA, 2020).

Ademais, o boletim de acompanhamento da indústria brasileira, do MME, aponta que, durante o ano de 2021, o gás natural apresentou variações no preço médio, resultando em um acréscimo nas despesas mensais das indústrias. Além disso, a Federação das Indústrias do Estado de Santa Catarina (FIESC, 2022) relatou que a tarifa do gás natural para a indústria de Santa Catarina teve um reajuste de 41,05% no mês de julho de 2022.

Os pellets produzidos com a biomassa de madeira, por sua vez, apresentam algumas vantagens se comparado a outros combustíveis, tais como a forma mecanicamente estável, alto poder calorífico, baixa umidade (geralmente abaixo de 6,5%), granulometria regular - facilita o armazenamento e o transporte (redução do custo de frete). No aspecto ambiental, tanto na produção quanto no consumo, o impacto ao meio ambiente é minimizado, visto que reduz o consumo de combustíveis fósseis, e a emissão de cinzas e partículas poluentes (BRASIL BIOMASSA, 2022).

À vista disso, a Figura 16 mostra que a substituição do gás natural por pellets de madeira se mostrou favorável nesse trabalho, proporcionando uma redução no LCOH (R\$/MWh<sub>th</sub>) de 28,13%, 63,25%, 60,65%, 46,87%, 56,40%, 60,67% e 59,96%, para as cidades de Recife, Fortaleza, Campo Grande, São Paulo, Belo Horizonte, Curitiba e Florianópolis, respectivamente.

**Figura 16:** Comparativo LCOH do gás natural e pellets de madeira

FONTE: Autoria Própria (2022)

## 4.2 PLANTAS HÍBRIDAS

Neste tópico são apresentados os resultados de desempenho e caracterização energética dos cenários C e D propostos, ao longo de um ano de operação. Os cenários híbridos correspondem à geração de vapor saturado de processo na pressão absoluta de 10 bar com o objetivo de promover a redução do consumo de combustível das caldeiras.

Para cada cidade estudada, há uma variação do recurso solar e, por consequência, a conversão da radiação solar em energia térmica é diferente em cada local. Os dados foram obtidos por meio do SAM, gerados a partir do ano meteorológico típico de cada cidade.

### 4.2.1 Análise termodinâmica dos cenários estudados

A simulação no SAM mostrou os resultados relativos à condição de projeto do campo solar (Tabela 10). A área do campo solar foi dimensionada em 7084 m<sup>2</sup>. A capacidade térmica do campo solar já considerando o múltiplo solar adotado (20%) foi de 4,08 MW<sub>th</sub>. Importante destacar que, apesar da capacidade do campo solar ser de 4,08 MW<sub>th</sub>, a geração de vapor esteve limitada à

capacidade de 3,4 MW<sub>th</sub>, como forma de evitar que as caldeiras operassem abaixo da carga de 50%.

**Tabela 11** – Dados de dimensões do campo solar e eficiência do *loop* na condição de projeto

Descrição	Unidade	Todas as cidades estudadas
Potência térmica alvo do receptor	MW <sub>th</sub>	4,08
Eficiência de conversão total do <i>loop</i>	-	0,65
Área efetiva de espelhos	m <sup>2</sup>	5842
Área do campo solar	m <sup>2</sup>	7084
Área total de terreno necessária para instalar o campo solar	m <sup>2</sup>	8500

FONTE: Adaptado SAM (2022);

Os valores da energia térmica total gerada pelo campo solar em diferentes meses do ano, mostram que há uma variação do DNI disponível de um mês para o outro, fazendo com que se tenha uma diferença de energia térmica gerada.

Devido ao Brasil ter diferentes características climáticas para cada região, o campo solar instalado em cada cidade estudada apresentou uma fração solar anual distinta. Sendo que, para as unidades geradoras a GN e a pellets de madeira a fração solar encontrada foi a mesma, isso ocorre devido a geração de vapor esteve limitada à capacidade de 3,4 MW<sub>th</sub>. Nota-se que Fortaleza, Recife e Belo Horizonte apresentam os maiores valores de fração solar e, por consequência, maior economia de combustível (Tabela 11).

**Tabela 12** – Fração solar por cidade estudada

Cidades	Fração Solar anual ( $F_{Sgn}$ e $F_{Sp}$ (%))
Recife - PE	11,27
Fortaleza - CE	11,92
Campo Grande - MS	8,67
São Paulo - SP	7,21
Belo Horizonte - MG	11,51
Curitiba - PR	4,82
Florianópolis - SC	5,60

FONTE: Autoria Própria (2022)

Os resultados da análise termodinâmica para as plantas híbridas a gás natural (cenário C) podem ser verificados na Tabela 12, que apresenta a quantidade economizada de gás natural, em milhares de m<sup>3</sup>/ano. A Tabela 13 mostra a quantidade economizada de pellets de madeira, em t/ano (cenário D). As cidades que se encontram na região Nordeste do Brasil se destacam quanto a economia de combustível. Como exemplo, Recife se destaca por ter uma economia de 11,04% no consumo de gás natural ou pellets de madeira. As cidades de Curitiba e Florianópolis, por sua vez, não apresentaram um valor expressivo quanto à economia de GN e pellets de madeira, ao longo de um ano.

**Tabela 13** – Resultados relativos ao cenário estudado (GN – Solar térmica)

<b>Cidades</b>	<b>Recife - PE</b>	<b>Fortaleza - CE</b>	<b>Campo Grande - MS</b>	<b>São Paulo - SP</b>	<b>Belo Horizonte - MG</b>	<b>Curitiba - PR</b>	<b>Florianópolis - SC</b>
<b>Consumo de GN (10<sup>3</sup> Nm<sup>3</sup>/ano)</b>	6.018,49	5.974,49	6.194,53	6.293,70	6.002,45	6.455,73	6.402,83
<b>GN economizado (10<sup>3</sup> Nm<sup>3</sup>/ano)</b>	764,34	808,34	588,31	489,13	780,39	327,11	380,00
<b>Energia relacionada à geração de vapor (MWh<sub>th</sub>/ano)</b>	81.528,06	81.528,06	81.528,06	81.528,06	81.528,06	81.528,06	81.528,06

FONTE: Autoria Própria (2022)

**Tabela 14** – Resultados relativos ao cenário estudado (Pellets de madeira – Solar térmica)

<b>Cidades</b>	<b>Recife - PE</b>	<b>Fortaleza - CE</b>	<b>Campo Grande - MS</b>	<b>São Paulo - SP</b>	<b>Belo Horizonte - MG</b>	<b>Curitiba - PR</b>	<b>Florianópolis - SC</b>
<b>Consumo de pellets (t/ano)</b>	13.466,75	13.368,29	13.860,62	14.082,53	13.430,83	14.445,08	14.326,72
<b>Pellets economizado (t/ano)</b>	1.710,25	1.808,71	1.316,38	1.094,47	1.746,17	731,92	850,28
<b>Energia relacionada à geração de vapor (MWh<sub>th</sub>/ano)</b>	81.528,06	81.528,06	81.528,06	81.528,06	81.528,06	81.528,06	81.528,06

FONTE: Autoria Própria (2022)

#### 4.2.2 Análise Econômica

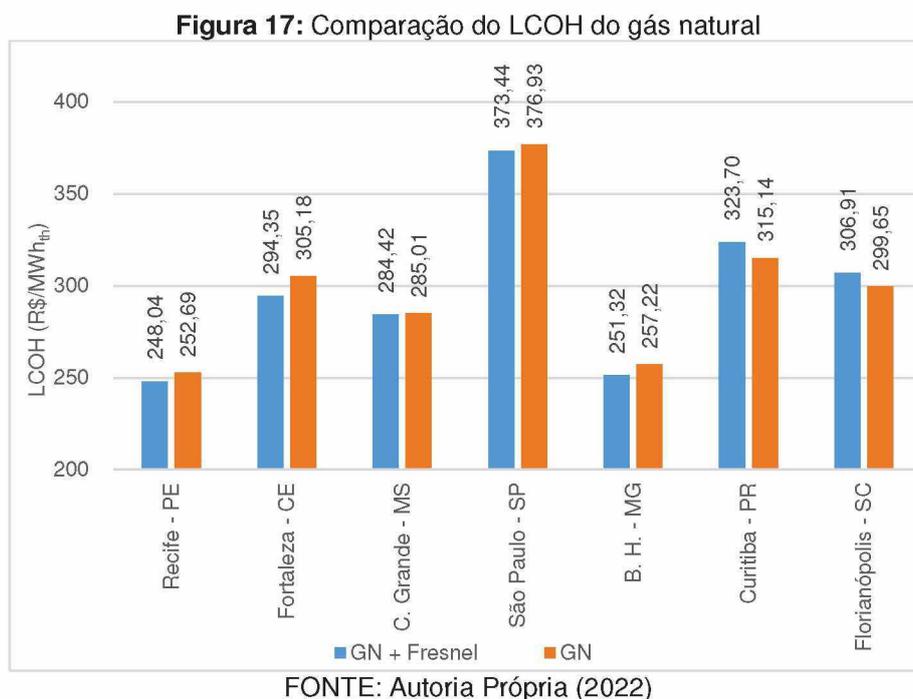
A Tabela 15 mostra a economia de gás natural em R\$/ano. Se o valor do LCOH híbrido for maior que o LCOH do sistema a gás natural, o resultado encontrado se reflete no período de retorno do investimento, fazendo com que seja elevado. O resultado quanto ao LCOH varia de 251,32 R\$/MWh<sub>th</sub> a 373,44 R\$/MWh<sub>th</sub>, em que a cidade de São Paulo se destaca por ter um custo elevado, que ocorre devido o preço médio específico do GN ser o maior entre as cidades estudadas. Além disso, na tabela são apresentados os valores correspondentes ao VPL, TIR e *payback* descontado para os cenários avaliados. Sabendo que se a TIR tiver uma taxa de atratividade abaixo de 10%, os benefícios da integração dos concentradores Fresnel com a caldeira a gás natural não são positivos, assim como o VPL. Dessa forma o retorno do capital não se dará ao longo da vida útil da planta. Verificou-se isso para as cidades de Curitiba e Florianópolis.

**Tabela 15** – Resultados econômicos da planta híbrida (GN – Solar térmica)

<b>Cidades</b>	<b>Recife - PE</b>	<b>Fortaleza - CE</b>	<b>Campo Grande - MS</b>	<b>São Paulo - SP</b>	<b>Belo Horizonte - MG</b>	<b>Curitiba - PR</b>	<b>Florianópolis - SC</b>
<b>Economia anual (10<sup>3</sup> R\$/ano)</b>	2.309,82	2.813,03	1.978,54	2.214,68	2.410,95	1.218,66	1.338,82
<b>Planta híbrida combinada LCOH (R\$/MWh<sub>th</sub>)</b>	248,04	294,35	284,42	373,44	251,32	323,70	306,91
<b>Planta híbrida combinada LCOH (US\$/MWh<sub>th</sub>)</b>	44,78	53,14	51,35	67,41	45,37	58,44	55,40
<b>TIR (%)</b>	15,09	19,75	12,07	14,22	16,02	4,83	6,05
<b>VPL (10<sup>3</sup> R\$)</b>	5.051,09	9.618,71	2.044,02	4.187,44	5.969,08	-4.853,39	-3.762,71
<b>Payback</b>	11 anos e 10 meses	9 anos e 8 meses	16 anos e 1 mês	13 anos e 1 mês	10 anos e 10 meses	> 25 anos	> 25 anos

FONTE: Autoria Própria (2022) \* 1 dólar = 5,54 reais (média referente ao mês de outubro de 2021 (BCB, 2021)).

Na Figura 17 são apresentados os valores de LCOH das plantas a GN e plantas híbridas GN-solar térmica (cenários A e C). Com exceção de Curitiba e Florianópolis, observa-se que há uma redução do LCOH ao interligar os concentradores Fresnel com a caldeira a GN. Nesse contexto, observa-se que para as cidades de Fortaleza, Belo Horizonte e Recife as reduções para o LCOH foram de -3,55%, -2,92% e -1,84%, respectivamente.

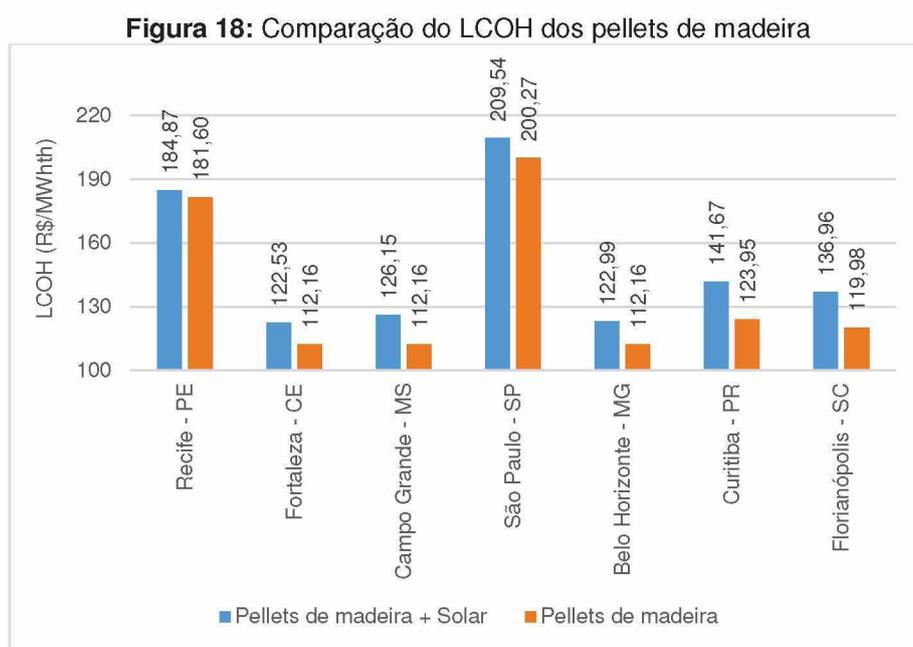


Dessa forma, o estudo apresenta resultados com potencial promissor quanto à implantação da tecnologia com concentradores Fresnel na geração de vapor saturado no setor industrial que fazem uso de caldeiras a gás natural, principalmente nas cidades de Fortaleza, Belo Horizonte e Recife. Caso, futuramente tenha uma redução de custo dos equipamentos, há possibilidade de reduzir o tempo de investimento e, conseqüentemente, podendo minimizar as emissões de gases de efeito estufa.

Na Tabela 16 são mostrados resultados da análise econômica para as plantas a pellets de madeira integradas com energia solar térmica. Nesse caso, nota-se que o LCOH variou de 122,53 R\$/MWh<sub>th</sub> (Fortaleza - CE) a 209,54 R\$/MWh<sub>th</sub> (São Paulo - SP). Além disso, foram apresentados os indicadores de custos do vapor referentes à integração do campo solar Fresnel com à unidade geradora de vapor. Verifica-se que os valores obtidos da TIR,

para todas as cidades estudadas ficaram abaixo de 10%. Consequentemente, os valores de VPL foram negativos e o *payback* maior do que a vida útil sugerida pelo fabricante do campo solar. Conclui-se, desse modo, que implantação da tecnologia CSP para o cenário D foi inviável.

Na Figura 18 pode-se observar que para todas as cidades aconteceu um aumento do valor do LCOH ao integrar os concentradores Fresnel com a planta que faz uso de pellets de madeira como combustível. Isso aconteceu devido ao elevado preço dos concentradores Fresnel frente às receitas inerentes ao menos consumo de combustível.



FONTE: Autoria Própria (2022)

Contudo, por ter uma economia anual considerada relativamente baixa, comparada ao preço do sistema que utiliza gás natural, o sistema a pellets tem um investimento que necessita que mais tempo para que o investimento se torne viável, ou seja, é inviável a hibridização da tecnologia Fresnel interligada a unidades geradores de vapor a pellets de madeira.

**Tabela 16** – Resultados econômicos da planta híbrida (Pellets de madeira – Solar térmica)

<b>Cidades</b>	<b>Recife - PE</b>	<b>Fortaleza - CE</b>	<b>Campo Grande - MS</b>	<b>São Paulo - SP</b>	<b>Belo Horizonte - MG</b>	<b>Curitiba - PR</b>	<b>Florianópolis - SC</b>
<b>Economia anual (10<sup>3</sup> R\$/ano)</b>	1.664,11	1.085,23	789, 83	1.174,73	1.047,70	485,51	545,88
<b>Planta híbrida combinada LCOH (R\$/MWh<sub>th</sub>)</b>	184,87	122,53	126,15	209,54	122,99	141,67	136,96
<b>Planta híbrida combinada LCOH (US\$/MWh<sub>th</sub>)</b>	33,37	22,12	22,77	37,82	22,20	25,57	24,72
<b>TIR (%)</b>	9,17	3,42	- 0,09	4,37	3,00	- 4,93	- 3,79
<b>VPL (10<sup>3</sup> R\$)</b>	-810,07	-6.064,61	-8.745,99	-5.252,23	-6.405,25	-1.082,37	-10.960,31
<b>Payback</b>	> 25 anos	> 25 anos	> 25 anos	> 25 anos	> 25 anos	> 25 anos	> 25 anos

FONTE: Autoria Própria (2022) \* 1 dólar = 5,54 reais (média referente ao mês de outubro de 2021 (BCB, 2021)).

Mundialmente, o coletor Fresnel ainda está em fase de consolidação. Ademais, um dos maiores desafios para implantar a tecnologia CSP na indústria é a competitividade econômica, no qual o tempo de retorno do investimento é um dos parâmetros analisados por empresários, que tendem a minimizar o risco quanto a instalação de novas tecnologia nas indústrias (ALMEIDA, 2018). Assim, por ter uma taxa de atratividade fixada em 10%, a hibridização de caldeiras a pellets de madeira não se mostrou viável, devido ser um biocombustível com preço relativamente baixo se comparado ao gás natural.

Ainda, ao apresentar a análise comparativa para os cenários C e D, o LCOH torna-se um indicador a ser utilizado para avaliar a atratividade econômica do gás natural e dos pellets de madeira. Assim, é preferível escolher indústrias que fazem uso do gás natural para interligar os concentradores Fresnel para geração direta de vapor. Em outras palavras, fica mais fácil de viabilizar a instalação de um campo solar quando gás natural é o combustível utilizado.

#### 4.3 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

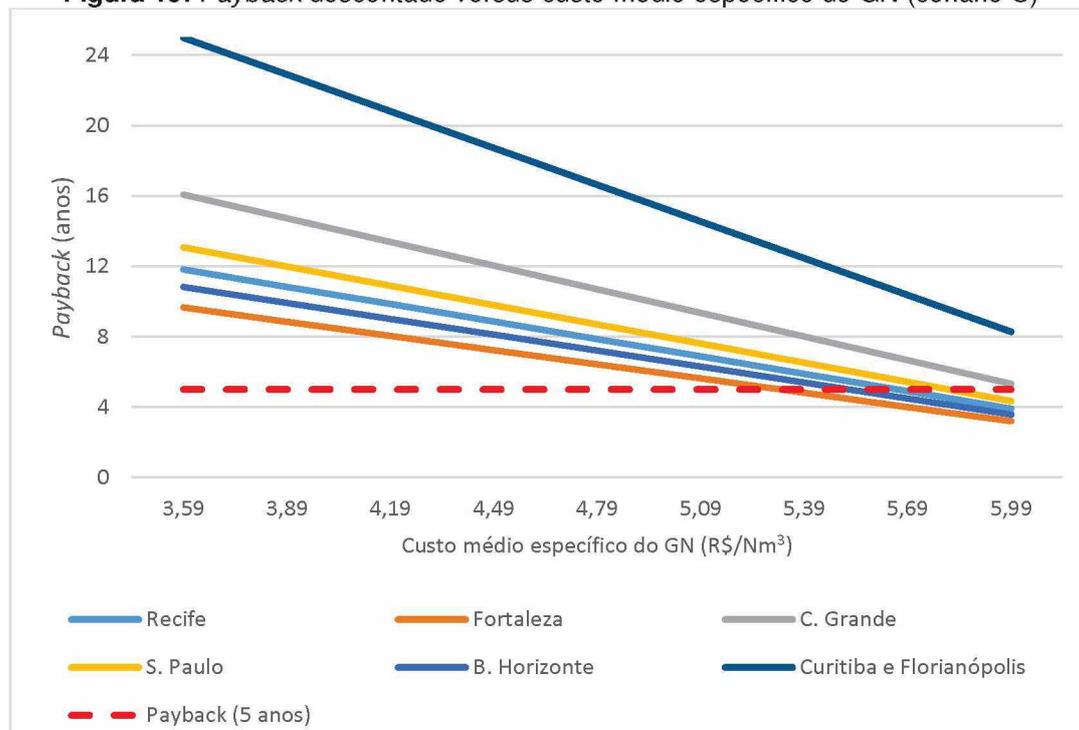
A Tabela 17, mostra a primeira análise de sensibilidade realizada, no qual foi avaliado o impacto da área do campo solar na fração solar anual do sistema. Como pode ser observado, uma redução da quantidade de módulos *Fresnel Collector LF-11* está associada a uma redução da fração solar e, conseqüentemente, a uma menor economia de combustível. Nota-se que mesmo com o aumento da área do campo solar, para as cidades de São Paulo, Curitiba e Florianópolis não há uma fração solar anual que venha a ser viável a implementação do sistema CSP.

Um dos parâmetros que o custo nivelado de calor depende é o preço do combustível. Para o cenário C são apresentadas variações no custo médio específico do GN de 3,59<sup>6</sup> a 5,99 R\$/Nm<sup>3</sup> em relação a referência (*payback* descontado de 5 anos) (Figura 19). Assim, para o preço atualizado do GN de 5,39 R\$/Nm<sup>3</sup>, torna-se viável a integração dos concentradores Fresnel e a caldeira a gás natural, no qual o tempo de retorno do investimento é de 4 anos e 10 meses.

---

<sup>6</sup> Valor médio do custo médio específico do GN das cidades estudadas.

**Figura 19:** *Payback* descontado versus custo médio específico do GN (cenário C)



FONTE: Autoria Própria (2022)

Ademais, nota-se que a variação do preço dos combustíveis se mostra como um parâmetro que afeta diretamente o valor do LCOH. Para que as cidades de Curitiba e Florianópolis venham a ter um *payback* descontado menor que 5 anos, os preços do GN serão elevados se comparados aos encontrados no mercado brasileiro.

**Tabela 17** – Fração solar anual e valores da área do campo solar

	Cidades	Recife - PE	Fortaleza - CE	Campo Grande - MS	São Paulo - SP	Belo Horizonte - MG	Curitiba - PR	Florianópolis - SC
Faixa de análise	Fração Solar Anual (%)	10,06 - 13,68	10,64 - 14,47	7,74 - 10,53	6,44 - 8,76	10,27 - 13,97	4,31 - 5,86	5,0 - 6,80
	Área do campo Solar (m <sup>2</sup> )	6325 - 8602	6325 - 8602	6325 - 8602	6325 - 8602	6325 - 8602	6325 - 8602	6325 - 8602
	<i>Payback</i> descontado (anos)	4 a 12	4 a 10	6 a 16	5 a 14	4 a 11	9 a 25	9 a 25

FONTE: Autoria Própria (2022)

Por sua vez, para o cenário D, tendo como base o preço dos pellets de madeira de 735,96 R\$/t<sup>7</sup>, para que a hibridização da biomassa de madeira com o campo solar seja viável, e se tenha um *payback* descontado menor que 5 anos, o preço do pellets de madeira deve ser de cerca de 1335,00 R\$/t.

---

<sup>7</sup> Valor médio do preço da tonelada dos pellets de madeira de todas as cidades estudadas.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os sistemas que fazem uso de caldeiras a pellets de madeira (cenário B) se mostraram viáveis ao serem instalados. Entretanto, por não um mercado consolidado no Brasil, os pellets podem ser considerados um risco para a indústria, visto que o fabricante pode não ter o produto quando for necessário.

Para o cenário C houve economia de combustível ao integrar os concentradores Fresnel a unidades geradoras de vapor a gás natural. Contudo, os resultados mostraram que, mesmo fixando a capacidade do campo solar em  $3,4 \text{ MW}_{\text{th}}$ , as cidades de Curitiba e Florianópolis tiveram o LCOH de vapor maior que o da planta a gás natural.

Ademais, a integração de sistemas Fresnel a caldeiras a gás natural em processos de geração de vapor saturado nas indústrias instaladas principalmente nas cidades de Fortaleza, Belo Horizonte e Recife se apresentam promissoras. Nessas regiões o Brasil se destaca por apresentar níveis de radiação solar relevantes, principalmente na região Nordeste. Entretanto, o sistema híbrido (pellets de madeira – solar térmico) não se mostrou satisfatório, com *payback* maior que o tempo de vida útil do equipamento.

Além disso, apesar da capacidade do campo solar ter sido considerada constante nesse trabalho, o sistema pode ser ampliado por apresentar um design modular. Desse modo, quanto maior a área do campo solar, maior será a fração solar da unidade. Entretanto, se torna importante observar se a carga parcial mínima que a caldeira a gás natural poderá operar de modo a não promover queda significativa na sua eficiência ou proporcionar a redução das emissões gases na atmosfera, ficando acima do estabelecido na legislação.

Por fim, os resultados da análise de custo para o vapor de processo mostram que cidades que se encontram localizadas em regiões com DNI acima de  $1700 \text{ kWh/m}^2\text{-ano}$ , e com fração solar anual superior a 10% apresentam condições favoráveis para a integração do calor de processo solar direto nos segmentos industriais que utilizam gás natural.

Contudo, no Brasil ainda se faz necessária a redução nos preços dos concentradores Fresnel, para que o investimento seja menor, assim se tornando cada vez mais vantajosa sua instalação.

## 5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros, esta seção apresenta as seguintes sugestões:

- Uma comparação entre diferentes ferramentas para modelagem de geração solar direta de vapor.
- Uma análise econômica em outras regiões do Brasil que fazem uso do gás natural.
- Uma análise de sensibilidade considerando outros parâmetros que venham a influenciar no LCOH híbrido.

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

AKAR, S.; KURUP, P.; MCTIGUE, J.; BOYD, M. **Renewable Thermal Hybridization Framework for Industrial Process Heat Applications**. Anais da Conferência AIP 2445, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1063/5.0085805>.

ALFA LAVAL. **Caldeira LHC**. Disponível em: Disponível em: <https://www.alfalaval.com.br/produtos/transferencia-de-calor/caldeiras-industriais/caldeira-lhc/>. Acesso em: 05 jan. 2022.

ALMEIDA, P. Guerra deve trazer impacto modesto à energia elétrica, diz Instituto Acende Brasil. **CNN Brasil**, 2022. Disponível em: <https://www.cnnbrasil.com.br/business/guerra-deve-trazer-impacto-modesto-a-energia-eletrica-diz-instituto-acende-brasil/>. Acesso em: 27 de abr. de 2022.

ALMEIDA, T. E. G. **Energia termossolar como alternativa na geração de vapor e água quente no setor agroindustrial**. 2018. 130 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, 2018.

ALMEIDA, T. E. G.; BURIN, E.; BAZZO, E. **Solar energy as an alternative to partially supply the steam and the hot water demands of a poultry slaughterhouse**. ECOS 2018 – 31st International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems. Guimarães, Portugal, 17 a 22 jun. 2018.

BABA, Y. F.; et al. Preliminary cost-effectiveness assessment of a Linear Fresnel Concentrator: Case Studies in Thermal Engineering, v. 22, 2020.

BANCO CENTRAL DO BRASIL (BCB). **Cotações e boletins**. Disponível em: <https://www.bcb.gov.br/estabilidadefinanceira/historicocotacoes>.

BAZZO, E. **Geração de vapor**. UFSC: Florianópolis, 2 ed., 1995.

BEZERRA, P. H. S. **Energia solar concentrada: simulação do desempenho de heliostatos de pequeno porte**. 208 f. Tese (Doutorado). Universidade Estadual Paulista Faculdade de Ciências Agronômicas, Botucatu, 2017.

BRASIL BIOMASSA. **Pellets**. 2022. Disponível em: <https://www.brasilbiomassapellets.com/>. Acesso em: 5 jul. 2022.

BIZZO, Waldir A. EM 722 - **Geração, distribuição e utilização de vapor**. Cap. 4. UNICAMP, 2003. Disponível em: <http://www.fem.unicamp.br/~em672/GERVAP4.pdf>. Acesso: 01 mar. 2022.

BOTELHO, M. H. C.; BIFANO, H. M. **Operação de caldeiras: gerenciamento, controle e manutenção**. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2015.

BP. **Statistical Review of World Energy 2021**. BP, ed. 70. Disponível em: <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2021-full-report.pdf>.

BURIN, E. L. K.; SILVA, L. R., BAZZO, E. **Concentrated Solar Energy as an Alternative to Reduce the Natural Gas Consumption in Industry**. 18th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering (ENCIT), 2020.

CARDOSO, B. M. **Uso da Biomassa como Alternativa Energética**. 112 f. Projeto (Graduação). Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2012. Disponível

CASCAES, B. P. **Avaliação de oportunidades do uso de energia solar térmica em aplicações industriais no Brasil**. 87 f. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2019.

CORTÉS, F. *et al.* Techno-Economical Evaluation of Parabolic Trough Collectors Systems for Steam Processes in the Chilean Industry. **AIP Conference Proceedings 2033**, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1063/1.5067156>.

CASTRO, L. C. e. **Análise comparativa para geração de energia heliotérmica em diferentes regiões brasileiras**. 65 p. Projeto (Graduação). Universidade de Brasília. 2016.

CARVALHO, N.P.R. **Implementação do plano de controlo, inspeção e ensaio na produção de pellets de madeira**. 43 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologias Ambientais), Instituto Politécnico de Viseu, 1 ed., Portugal, 2011.

COMPANHIA PAULISTA DE FORÇA E LUZ (CPFL). **Sistema Híbrido Solar/Biomassa**. Disponível em: <https://www.cpfl.com.br/energias-sustentaveis/inovacao/projetos/Paginas/de0041-sistema-hibrido-solar-biomassa.aspx>. Acesso em: 05 out. 2021.

ENCKE. Energy paper pellet making machine / MSW RDF pellet production CE certification. 2019. Disponível em: <http://www.biomasspelletmillmachine.com/sale-12292407-energy-paper-pellet-making-machine-msw-rdf-pellet-production-ce-certification.html>. Acesso em: 10 out. 2021.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Relatório Síntese 2022: Ano Base 2021**. Rio de Janeiro, 2022. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-ben>.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Balanco energético nacional 2021: Relatório Síntese/Ano Base 2020**. Rio de Janeiro, 2021. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2021>.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Plano Indicativo de Gasodutos de Transporte** - PIG 2020. 2020. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Paginas/Plano-Indicativo-de-Gasodutos-de-Transporte---PIG-2020.aspx>

FAN, J.-L. et al. A levelized cost of hydrogen (LCOH) comparison of coal-to-hydrogen with CCS and water electrolysis powered by renewable energy in China. **Energy**, v. 242, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.123003>

FARJANA, S. H.; et al. Solar process heat in industrial system – A global review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 82, p. 2270 – 2286, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.08.065>.

FGV ENERGIA. Boletim de conjuntura do setor energético. **FGV Energia**, jan. 2020. Disponível em: <https://fgvenergia.fgv.br/publicacao/boletim-de-conjuntura-janeiro2020>.

FEDERAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DO ESTADO DE SANTA CATARINA (FIESC). **Tarifa do gás natural para a indústria aumenta 41% em julho**. 2022. Disponível em: <https://fiesc.com.br/pt-br/imprensa/tarifa-do-gas-natural-para-industria-aumenta-41-em-julho>. Acesso em: 8 jul. 2022.

GABBRIELLI, R.; et al. Levelized cost of heat for linear Fresnel concentrated solar systems. **Energy Procedia**, 49, p. 1340-1349, 2014.

GABRIELLI, J. S.; NOZAKI, W. **A guerra e a bomba no posto de combustível**. Instituto de estudos estratégicos de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (INEEP), 2022.

GARCIA, D.P. **Caracterização química, física e térmica de pellets de madeira produzidos no Brasil**. Dissertação (Mestrado), 103 f. Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2010.

GARCIA, D. P.; CARASCHIL, J.C.; VENTORIM, G. O setor de pellets de madeira no Brasil. **Revista ciência da madeira**, v. 8, n. 1, 2017. Disponível em: DOI: 10.12953/2177-6830/rcm.v8n1p21-28.

GARCIA, R. **Combustíveis e Combustão Industrial**. Rio de Janeiro: Interciência, 2002.

GHARBI, N. E.; et al. A comparative study between parabolic trough collector and linear Fresnel reflector technologies. **Energy Procedia**, Amsterdam, v. 6, p. 566-572, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2011.05.065>.

GONÇALVES, J. T. **Estudo Técnico-Económico de um Sistema Solar Termoelétrico com Back-up a Biomassa**. 146 F. Dissertação (Mestrado). Universidade Nova Lisboa, Portugal, 2015.

ILDEFONSO, Larissa Fernanda Nunes. **Avaliação técnica-econômica da utilização de diferentes fluidos térmicos em uma usina de concentração solar do tipo Calha Parabólica de 100MWe**. 2019. 56 f. Monografia (Especialização em Fontes Renováveis) – Universidade Federal de Minas Gerais, 2019.

INDUSTRIAL SOLAR. Technologies: Fresnel collector LF-11. 2021. Disponível em: <https://www.industrial-solar.de/>

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA (IPEA). **Dicionário de conceitos**. IPEA, [20--]. Disponível em: [http://www.ipeadata.gov.br/iframe\\_dicionario.aspx](http://www.ipeadata.gov.br/iframe_dicionario.aspx).

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **Renewables 2021 - Analysis and forecast to 2026**. IEA, Paris, 2021.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **Renewables 2020 - Analysis and forecast to 2025**. IEA, Paris, 2020.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **World Energy Outlook 2020**. IEA, Paris, 2020.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **Renewables 2019 Market analysis and forecast from 2019 to 2024**. IEA, Paris, 2019.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **World Energy Outlook 2019: Flagship report**, nov. 2019. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2019>.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **Data and statistics**. 2018. Disponível em: [https://www.iea.org/data-and-statistics?country=WORLD&fuel=Energy%20supply&indicator=Total%20energy%20supply%20\(TES\)%20by%20source](https://www.iea.org/data-and-statistics?country=WORLD&fuel=Energy%20supply&indicator=Total%20energy%20supply%20(TES)%20by%20source).

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **Global Energy & CO<sub>2</sub> Status Report: The latest trends in energy and emissions in 2018**. Paris: IEA Publications, p. 29, 2019b. Disponível em: <https://www.iea.org/geco/>.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **Renewables information: Overview 2017**. IEA Statistics, p. 8, 2017. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/renewables-2017>.

INTERNATIONAL ENERGY OUTLOOK 2020 (IEO), 2020. U.S. **Energy Information Administration**. Washington, DC. Disponível em: <https://www.eia.gov/outlooks/ieo/>

INTERNACIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (IRENA). **Renewable Power Generation Costs in 2020**. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, 2021.

INTERNACIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (IRENA). Renewable Power Generation Costs in 2019. **International Renewable Energy Agency**, Abu Dhabi, 2020.

INTERNACIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (IRENA). **Solar Heat for Industrial Processes**. IEA-ETSAP e IRENA, 2015.

KAMI, E. C. A. **Análise termoeconômica de sistema híbrido solar térmico integrado à unidade de recuperação energética de resíduos sólidos urbanos**. 229 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, 2019.

KOSMAN, K. Global Heating Wood Pellet Demand: Current and Projection. **Madison's Report, Vancouver**, Canadá, 2019. Disponível em: <https://madisonsreport.com/2019/11/08/global-heating-wood-pellet-demand-current-and-projection/>.

KUMAR, L.; HASANUZZAMAN, M.; RAHIM, N.A. Global advancement of solar thermal energy technologies for industrial process heat and its future prospects: A review. **Energy Conversion and Management**, v. 195, p. 885-908, 2019.

KUMAR, R.; CHAITANYA, N.V. K.; KUMAR, N. S. Solar thermal energy technologies and its applications for process heating and power generation – A review. **Journal of Cleaner Production**, v. 282, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125296>.

KURUP, P.; ZHU, G.; TURCHI, C. Solar Process Heat Potential in California. **Internacional Solar Energy Society**, Palma de Maiorca, Espanha, 2016. DOI: 10.18086/eurosun.2016.02.07.

KURUP, P.; TURCHI, C. Initial Investigation into the Potential of CSP Industrial Process Heat for the Southwest United States. **Technical Report**. Golden: NREL, nov. 2015. Disponível em: <https://www.nrel.gov/docs/fy16osti/64709.pdf>

LEÃO, R. **A guerra econômica e energética entre EUA e Rússia impactam o mundo inteiro**. Instituto de estudos estratégicos de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (INEEP), 2022.

LETHIKANGAS, P. Quality properties of pelletised sawdust, logging residues and bark. **Biomass and Bioenergy**, v.19, n.20, p.351-360, 2001.

LÓPEZ, G. de S. **Techno-economic Analysis and Market Potential Study of Solar Heat in Industrial Processes A Fresnel Direct Steam Generation case study**. 2021. 133 p. Dissertação (Mestrado) – KTH, School of Industrial Engineering and Management (ITM), Valência, 2021.

LOVEGROVE, K. ; CSIRO, W. S. Introduction to concentrating solar power (CSP) technology. *In: Concentrating Solar Power Technology - Principles, Developments and applications*. **Woodhead Publishing**, p. 3 – 15, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1533/9780857096173.1.3>.

MANUAL DE INSTALAÇÕES GÁS NATURAL SEGMENTOS RESIDENCIAL E COMERCIAL. In: **GasBrasiliano**. 1. ed. [S. l.], [201-]. Disponível em: <https://www.gasbrasiliano.com.br/media/upload/manual.pdf>. Acesso em: 30 nov. 2021.

MASSAS DE AR em *Só Geografia*. **Virtuous** Tecnologia da Informação, 2007-2022. Acesso em: 14 jun. 2022. Disponível em: <http://www.sogeografia.com.br/Conteudos/GeografiaFisica/Clima/massas.php>

MEYER, B. E. **Implementação de melhoria contínua para diminuição de consumo de vapor em uma empresa de extração de óleo vegetal**. 2018. 25 p. Trabalho de conclusão de especialização (Especialização) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Ponta Grossa, 2018.

MIDDELHOFF E., *et al.* Hybrid concentrated solar biomass (HCSB) systems for cogeneration: Techno-economic analysis for beef abattoirs in New South Wales, Australia. **Energy Conversion and Management**, v. 262, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115620>.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). Acompanhamento da indústria de gás natural. **Boletim mensal**, n. 179, 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/petroleo-gas-natural-e-biocombustiveis/publicacoes-1/boletim-mensal-de-acompanhamento-da-industria-de-gas-natural/2022-2>.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). **Resenha energética brasileira** – Ano base 2020. Secretaria de planejamento e desenvolvimento energético, jul. 2021.

MONTEIRO JUNIOR, O. L. **Estudo do controle de emissões de poluentes em caldeiras de alta pressão com queimadores convencionais, abordagem da eficiência versus custo do dano**. 109 f. Dissertação (Mestrado). Universidade do Estado do Rio de Janeiro, 2008.

MORIN, G. *et al.* **SUPERNOVA** – construction, control & performance of steam superheating linear Fresnel collector. SolarPACES Conference 2011, Granada Spain.

MORORÓ, V. C. **Avaliação de desempenho e emissões de caldeiras de vapor híbridas aplicada à biomassa**. 2016. 76 f. Monografia (Graduação), Universidade Tecnológica Federal do Ceará.

NIAN, V.; SUN, Q.; MA, Z.; LI, H. A comparative cost assessment of energy production from central heating plant or combined heat and power plant. **Energy Procedia**, v. 104, p. 556-561, 2016.

ORELLANA, B.B.M.A. **Utilização de resíduos de biomassa do Distrito Federal para fins energéticos**. 202 f. Tese (Doutorado em Ciências

Florestais). Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2019.

Paes, M. D. A. C. **Produção combinada de eletricidade e calor de processo industrial com energia solar**. 2018. 134 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares, 2018.

PEREIRA, A. S. **Uso de Pellets de madeira para fins energéticos**: pesquisa de mercado. V Prêmio SFB em Estudos de Economia e Mercado Florestal, 2019.

PEREIRA, E. B.; *et al.* Atlas brasileiro de energia solar. **INPE**, 2 ed., São José dos Campos, 2017. Disponível em: <http://doi.org/10.34024/978851700089>.

PEREIRA, E. M. D. **Uso Industrial da energia solar térmica**: desafios para o mercado brasileiro. Projeto Solar *Payback* Consumo Final de Energia no Setor Industrial – BR, 2018.

PETERSEIM, J. H.; WHITE, S.; TADROS, A.; HELLWIG, U. Concentrating solar power hybrid plants – Enabling cost effective synergies. **Renewable Energy**, Renewable Energy for Sustainable Development and Decarbonisation. v. 67, n. Supplement C, p. 178–185, 2014.

PINHEIRO, M. B. C. **Previsão da produção de fontes renováveis e não renováveis selecionadas da matriz energética brasileira**. Dissertação (Mestrado em Economia Rural). 78 p. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza/CE, 2020.

QUÉNO, L. R. M.; *et al.* Aspectos técnicos da produção de pellets de madeira. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 29, n. 3, p. 1478-1489, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.5902/1980509820606>.

RAMOS, L. C. de C.; *et al.* Viabilidade da substituição de caldeiras de acordo com a utilização de diferentes tipos de combustíveis. *In*: TRISTÃO, Hécio Martins *et al.* **Tópicos em Gestão da Produção**. Belo Horizonte - MG: Poisson, 2017. v. 7, cap. 3, p. 31-38. ISBN 978-85-93729-36-2. Disponível em: DOI: 10.5935/978-85-93729-36-2.2018B001.

REIS, PEDRO. **Vantagens e desvantagens do aquecimento com Pellets**. Portal de energias renováveis. 2020. Disponível em: <https://www.portal-energia.com/>.  
(<https://www.portal-energia.com/vantagens-e-desvantagens-do-aquecimento-com-recuperadores-a-pellets/#:~:text=Vantagens%20do%20Aquecimento%20com%20Pellets,entre%201%25%20a%203%25>.)

ROCCO, C. D.; MORABITO, R. **Um modelo de otimização para as operações de produção de vapor em caldeiras industriais**. Gest. Prod., São Carlos, v. 19, n. 2, p. 273-286, 2012.

SAIDUR, R., ABDELAZIZ, E.A.; DEMIRBAS, A.; HOSSAIN, M.S.; MEKHILEF, S. **A review on biomass as a fuel for boilers**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, p. 2262-2289, 2011.

SCHLAIFER, Perrine. **Performance Calculations and Optimization of a Fresnel Direct Steam Generation CSP Plant with Heat Storage**. 2013. 91 p. Dissertação (Energy Engineering) - KTH, School of Industrial Engineering and Management (ITM), Energy Technology, Heat and Power Technology, Estocolmo, 2013.

SCHETTINI, B. L. S.; et al. Avaliação da concentração do mercado mundial de pellets de madeira e as oportunidades para o Brasil. **Enciclopédia Biosfera**, Centro Científico Conhecer - Goiânia, v.13 n.23; p. 103 – 113, 2016. DOI: 10.18677/Enciclopedia\_Biosfera\_2016\_009.

SEPÚLVEDA, F. J. et al. Analysis of Potential Use of Linear Fresnel Collector for Direct Steam Generation in Industries of the Southwest of Europe. **Energies**, n. 12, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en12214049>.

SIQUEIRA NETO, A. T. de. **Planta de cogeração a biomassa como alternativa para geração de energia elétrica e térmica em uma indústria frigorífica de frangos**. 2018. 120 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, 2018.

SOARES, J., *et al.* Evaluation of the performance of hybrid CSP/biomass power plants. **International Journal of Low-Carbon Technologies**, v. 13, p. 380 - 387, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/ijlct/cty046>.

SOLAR PAYBACK. Energia termossolar para a indústria: **Brasil**. 2018. Disponível em: [https://www.solarwirtschaft.de/fileadmin/user\\_upload/national\\_process\\_heat\\_bra\\_spb.pdf](https://www.solarwirtschaft.de/fileadmin/user_upload/national_process_heat_bra_spb.pdf).

SOLAR PAYBACK. **Brasil**: estratégia da indústria termossolar. 2019. Disponível em: <https://www.solar-payback.com/?lang=pt-br>.

SORIA, R.; *et al.* **Market Potential of Linear Fresnel Collectors for Solar Heat Industrial Process in Latin-America-A Case Study in Ecuador**. AIP Conference Proceedings 2303, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1063/5.0028503>.

SRINIVAS, T.; REDDY, B. V. **Hybrid solar–biomass power plant without energy storage**. *Case Studies in Thermal Engineering*, V. 2, P. 75 – 81, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.csite.2013.12.004>.

STATISTA. **Natural gas prices for the industrial sector worldwide as of 2020, by select country**. Disponível em: <https://www.statista.com/statistics/253047/natural-gas-prices-in-selected-countries/>. Acesso em: 15 maio 2022.

STULTZ, S. C. **Steam**: Its Generation and Use. Babcock e Wilcox A/S, 40<sup>a</sup> ed., 1992.

TAVARES, R. L.; TAVARES, M. A. M. Perspectivas para a participação do Brasil no mercado internacional de pellets. **Holos**, v. 5, 2015. Disponível em: <https://www2.ifrn.edu.br/ojs/index.php/HOLOS/article/view/2662>. Acesso em: 21 jan. 2022.

THRÄN, D.; *et al.* **The dynamics of the global wood pellet markets and trade** – key regions, developments and impact factors. *Biofuels, Bioproducts, Biorefining*, p. 267–280, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/bbb.1910>.

TILAHUN, F. B.; BRANDARI, R.; MAMO, M. Design optimization of a hybrid solar-biomass plant to sustainably supply energy to industry: Methodology and case study. **Energy**, v. 220, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119736>.

TOLMASQUIM, M. T. **Energia Renovável**: Hidráulica, Biomassa, Eólica, Solar, Oceânica. EPE: Rio de Janeiro, 2016.

VAJEN, K.; LAUTERBACH, C.; SCHMITT, B. **Solar heat for industrial processes** – Potential, technologies and applications. International Conference on Solar energy for MENA region (INCOSOL), 2012.

VASS, T., *et al.* Tracking industry 2021. **IEA**, nov. 2021. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/tracking-industry-2021>.

VIDAL, A. C. F.; HORA, A. B. da. Perspectivas do setor da biomassa de madeira para geração de energia. **BNDES Setorial**, n. 33, 2011, p. 261 – 314. Disponível em: <https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/2523>.

## ANEXO A – PREÇO DO GN CONFORME FAIXAS DE CONSUMO

As Tabelas 18, 19, 20, 21, 22, 23 e 24 mostram as faixas de uso do gás natural no setor industrial, e seus preços com as tributações (mês de janeiro de 2022), conforme cada concessionária encontrada nos estados estudados.

**Tabela 18** – Faixa de uso e preços do GN (Curitiba – PR)

Faixa de uso (m <sup>3</sup> /dia)	Tarifa com tributos (R\$/m <sup>3</sup> )
0 a 500	4,4754
500 a 1000	3,9648
1000 a 2000	3,8324
2000 a 4000	3,7732
4000 a 8000	3,7378
8000 a 16000	3,7256
16000 a 32000	3,7064

FONTE: Adaptado Compagas (2022)

**Tabela 19** – Faixa de uso e preços do GN (Florianópolis - SC)

Faixa de uso (m <sup>3</sup> /dia)	Tarifa com tributos (R\$/m <sup>3</sup> )
0 a 5	6,1002
6 a 10	4,9083
11 a 70	4,812
71 a 1000	3,7137
1001 a 5000	3,6463
5001 a 10000	3,5726
10001 a 25000	3,5232
25001 a 50000	3,4885

FONTE: Adaptado Scgas (2022)

**Tabela 20** – Faixa de uso e preços do GN (Campo Grande – MS)

Faixa de uso (m <sup>3</sup> /dia)	Tarifa com tributos (R\$/m <sup>3</sup> )
0 a 0,5999	5,0732
0,6 a 15,999	4,8529
16 a 151	4,7352
151 a 301	4,3416
301 a 1001	3,958
10001 a 30000	3,3631

FONTE: Adaptado Msgas (2022)

**Tabela 21** – Faixa de uso e preços do GN (São Paulo – SP)

Faixa de uso (m <sup>3</sup> /dia)	Tarifa fixa com tributos (R\$/mês)	Tarifa variável com tributos (R\$/m <sup>3</sup> )
1 a 50000	330,52	4,527754

FONTE: Adaptado Comgas (2022)

**Tabela 22** – Faixa de uso e preços do GN (Belo Horizonte - MG)

Faixa de uso (m <sup>3</sup> /dia)	Tarifa com tributos (R\$/m <sup>3</sup> )
0 a 12500	4,555754
12501 a 50000	3,181089

FONTE: Adaptado Gasmig (2022)

**Tabela 23** – Faixa de uso e preços do GN (Recife – PE)

Faixa de uso (m <sup>3</sup> /dia)	Tarifa com tributos (R\$/m <sup>3</sup> )
0 a 1000	3,06660
1001 a 5000	3,04580
5001 a 10000	3,02980
10001 a 25000	3,02200

FONTE: Adaptado Copergás (2022)

**Tabela 24** – Faixa de uso e preços do GN (Fortaleza - CE)

Faixa de uso (m <sup>3</sup> /dia)	Tarifa com tributos (R\$/m <sup>3</sup> )
0 a 200	3,9804
201 a 1000	3,8994
1001 a 10000	3,7735
10001 a 30000	3,48

FONTE: Adaptado Cegas (2022)

## ANEXO B – FATORES DE CORREÇÃO (MODELO FRESNEL)

A Tabela 25 mostra os fatores de correção longitudinal e transversal relativo à eficiência óptica em função do ângulo de incidência, do modelo *Fresnel Collector LF-11*.

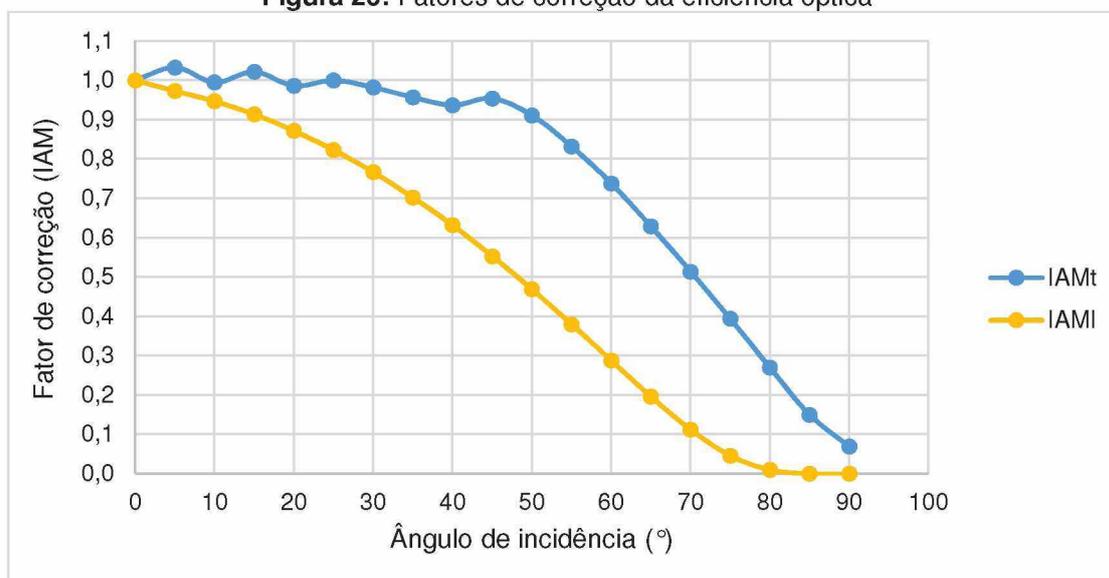
**Tabela 25** – Fator de correção longitudinal e transversal

Ângulo ( $\theta_i$ )	Transversal (IAM <sub>t</sub> )	Longitudinal (IAM <sub>l</sub> )
0	1,000	1,000
10	0,995	0,947
20	0,986	0,872
30	0,982	0,767
40	0,937	0,632
50	0,911	0,469
60	0,738	0,288
70	0,514	0,112
80	0,270	0,010
90	0,069	0,000

FONTE: Adaptado Industrial Solar (2021)

Ao observar os fatores de correção (Figura 20), nota-se que a curva de tendência do fator transversal exerce a maior influência quanto ao valor da eficiência óptica do campo Fresnel.

**Figura 20:** Fatores de correção da eficiência óptica



FONTE: Adaptado Industrial Solar (2021)