

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

DESEMPENHO TÉRMICO E FINANCEIRO DE UM SISTEMA DE AQUECIMENTO  
SOLAR DE ÁGUA UTILIZANDO COLETORES DO TIPO LINEAR FRESNEL PARA  
DIFERENTES CIDADES DO BRASIL

por

Giovani Gayer de Oliveira

Dissertação para obtenção do Título de  
Mestre em Engenharia

Porto Alegre, Junho de 2020

DESEMPENHO TÉRMICO E FINANCEIRO DE UM SISTEMA DE AQUECIMENTO  
SOLAR DE ÁGUA UTILIZANDO COLETORES DO TIPO LINEAR FRESNEL PARA  
DIFERENTES CIDADES DO BRASIL

por

Giovani Gayer de Oliveira

Engenheiro Mecânico

Dissertação submetida ao Corpo Docente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, PROMEC, da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de

Mestre em Engenharia

Área de Concentração: Energia

Orientador: Prof. Dr. Felipe Roman Centeno

Co-Orientador: Profa. Dra. Letícia Jenisch Rodrigues

Aprovada por:

Profa. Dra. Aline Cristiane Pan

MNPEF / UFRGS

Prof. Dr. Andrés Armando Mendiburu Zevallos

PROMECC / UFRGS

Prof. Dr. Paulo Smith Schneider

PROMECC / UFRGS

Prof. Dr. Fernando Marcelo Pereira

Coordenador do PROMEC

Porto Alegre, 19 de Junho de 2020

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço meu orientador, Prof. Dr. Felipe Roman Centeno, pela atenção e colaboração nos momentos necessários. Agradeço também à minha coorientadora, Profa. Dra. Letícia Jenisch Rodrigues, por todo auxílio e dedicação, os quais foram de grande importância para o desenvolvimento do trabalho.

À minha namorada, Tamara Silveira dos Santos, pela parceria e pelo apoio constante em todas as etapas pelas quais passei.

Sou grato também aos meus pais, Gisela Storti Gayer e Paulo Schutz de Oliveira, por todo incentivo e carinho, tanto na parte acadêmica quanto nos outros aspectos da minha vida.

Agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo suporte financeiro para a elaboração deste trabalho.

## RESUMO

A geração de calor representa uma parcela significativa da demanda energética industrial. Somado ao requerimento por baixas temperaturas e presença de recurso solar vantajoso no Brasil, há um potencial termossolar na indústria brasileira. Propõe-se determinar o desempenho térmico e financeiro de um sistema com coletores linear Fresnel para aquecimento de água. Os locais são adotados com base no critério de irradiação solar e presença da indústria de laticínios, sendo a demanda térmica obtida com base no processo de pasteurização do leite. O dimensionamento e parâmetros térmicos são obtidos com auxílio do software System Advisor Model (SAM). As métricas econômicas empregadas são Valor Presente Líquido (VPL) e Levelized Cost of Energy (LCOE). Por fim uma análise de sensibilidade financeira é realizada. Onze cidades brasileiras são escolhidas e a demanda térmica anual para o aquecimento de água é de 1437 MWh. O dimensionamento resultante é de 1.056 m<sup>2</sup> de área refletiva e 1.267,2 m<sup>2</sup> de terreno total. A análise térmica apresenta que a energia entregue ao sistema varia de 335 MWh (São Paulo) a 980 MWh (Ribeirão Preto). A avaliação econômica mostra sete cidades com resultado econômico positivo, nas quais o tempo de retorno é de 3 a 8 anos. Quanto ao LCOE, valores variam de R\$ 0,19/kWh a R\$ 0,54/kWh. A análise de sensibilidade mostrou maior impacto do preço da biomassa no VPL, e da área do campo solar no LCOE.

Palavras-chave: *Process Heat Linear Direct Steam; System Advisor Model*; Processo de pasteurização; Coletor linear Fresnel; Sensibilidade econômica.

## **ABSTRACT**

Heat generation represents a significant portion of industrial energy demand. In addition to the requirement for low temperatures and the presence of an advantageous solar resource in Brazil, there is a thermo-solar potential in the Brazilian industry. It is proposed to determine the thermal and financial performance of a system with Fresnel linear collectors for water heating. The locations are adopted based on the criterion of solar irradiation and presence of the dairy industry, with the thermal demand being obtained based on the process of pasteurization of milk. The dimensioning and thermal parameters are obtained with the aid of the System Advisor Model (SAM) software. The economic metrics employed are Net Present Value (NPV) and Levelized Cost of Energy (LCOE). Finally, a financial sensitivity analysis is performed. Eleven Brazilian cities are chosen and the annual thermal demand for water heating is 1437 MWh. The resulting dimensioning is 1,056 m<sup>2</sup> of reflective area and 1,267.2 m<sup>2</sup> of total land. The thermal analysis shows that the energy delivered to the system varies from 335 MWh (São Paulo) to 980 MWh (Ribeirão Preto). The economic evaluation shows seven cities with positive economic results, in which the payback time is 3 to 8 years. As for the LCOE, values vary from R \$ 0.19 / kWh to R \$ 0.54 / kWh. The sensitivity analysis showed a greater impact of the biomass price in the NPV, and the solar field area in the LCOE.

Keywords: Process Heat Linear Direct Steam; System Advisor Model; Pasteurization process; Linear Fresnel collector; Economic sensitivity.

# ÍNDICE

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1	Revisão Bibliográfica .....	3
1.2	Objetivo Principal.....	6
1.2.1	Objetivos Específicos .....	6
<b>2</b>	<b>ASPECTOS GERAIS E CONCEITOS IMPORTANTES .....</b>	<b>8</b>
2.1	Coletores Solares .....	8
2.1.1	Coletor Fresnel Linear .....	9
2.1.1.1	Modificadores de Ângulo de Incidência.....	12
2.2	Leite .....	13
2.2.1	Pasteurização .....	14
2.3	Pasteurizador .....	15
2.4	<i>System Advisor Model (SAM)</i> .....	16
2.4.1	Modelo Utilizado: <i>Process Heat Linear Direct Steam</i> .....	17
2.5	Análise Econômica .....	19
2.5.1	Valor Presente Líquido .....	19
2.5.2	Tempo de Retorno .....	20
2.5.2	Taxa Interna de Retorno .....	20
2.5.3	Custo Nivelado de Energia (LCOE).....	21
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>22</b>
3.1	Escolha dos Locais .....	23
3.2	Arquivos Climáticos .....	24
3.3	Software Utilizado.....	24
3.4	Coletor .....	24

3.4.1	Correção do Ângulo de Incidência .....	25
3.4.2	Perdas Térmicas no Receptor .....	26
3.5	Estimativa da Demanda Térmica.....	27
3.6	Condição de Projeto .....	28
3.7	Perda de Carga no Receptor .....	29
3.8	Dimensionamento.....	31
3.9	Propriedades e Parâmetros Avaliados .....	33
3.9.1	Temperatura de saída da água .....	33
3.9.2	Energia Entregue ao Sistema.....	33
3.9.3	Demanda Mínima de Energia da Água.....	33
3.9.4	Combustível Economizado.....	34
3.9.5	Eficiências dos Coletores.....	34
3.10	Viabilidade Econômica.....	35
3.10.1	Valor Presente Líquido, TIR e Tempo de Retorno.....	35
3.10.2	Custo Nivelado de Energia.....	35
3.10.3	Análise de Sensibilidade.....	36
<b>4</b>	<b>DISCUSSÃO E RESULTADOS .....</b>	<b>37</b>
4.1	Localidades Seleccionadas .....	37
4.2	Demanda Térmica.....	40
4.3	Performance Óptica do Coletor .....	40
4.3.1	Modificadores do Ângulo de Incidência .....	40
4.3.2	Efeitos de Geometria, Rastreamento e Espelhos .....	42
4.4	Caracterização do Receptor .....	42
4.5	Perda de Carga no Receptor .....	44
4.5	Dimensionamento.....	46
4.6	Horário de Funcionamento do Sistema .....	47

4.6	Vazão Mássica.....	48
4.7	Energia Entregue ao Fluido de Trabalho.....	49
4.8	Demanda Mínima de Energia da Água.....	49
4.9	Demanda Energética do Processo de Aquecimento da Água.....	51
4.10	Regimes de Operação do Sistema de Aquecimento Solar.....	52
4.11	Energia Auxiliar .....	52
4.12	Eficiências dos Coletores.....	53
4.13	Biomassa Economizada.....	55
4.14	Análise Econômica .....	55
4.14.1	Fluxo de Caixa.....	55
4.14.2	TIR.....	57
4.14.3	Valor Presente Líquido e Tempo de Retorno .....	58
4.14.4	LCOE.....	59
4.14.5	Análise de Sensibilidade.....	61
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>65</b>
5.1	Sugestões para Trabalhos Futuros .....	66
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>67</b>
<b>ANEXO A</b>	<b>Folha de Dados do Coletor LF-11.....</b>	<b>76</b>
<b>ANEXO B</b>	<b>Folha de Dados do Receptor PTR 70.....</b>	<b>77</b>



## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Comparação entre as lentes convencional e Fresnel [Adaptado de Günther, 2011].....	9
Figura 2.2	Conjunto de coletores Fresnel linear, absorvedor e refletor secundário .....	10
Figura 2.3	Ângulos de incidência no coletor solar [Adaptado de SAM, 2020]...	12
Figura 2.4(a)	Equipamento utilizado na pasteurização do leite: pasteurizador tipo trocador de calor tipo placas planas [Equilati, 2020].....	15
Figura 2.4(b)	Equipamento utilizado na pasteurização do leite: ilustração do princípio de funcionamento de um trocador de calor tipo placas planas [Alfa Laval, 2020a].....	15
Figura 2.5	Ilustração simplificada de um campo solar com dois loops em paralelo [Adaptado de Wagner, 2012].....	18
Figura 2.6	Página inicial do modelo adotado [Adaptado de SAM, 2020].....	19
Figura 3.1	Fluxograma das etapas seguidas na metodologia.....	22
Figura 3.2	Mapa com a distribuição da irradiação direta horizontal diária em média anual e as localidades com mais de 10 indústrias de laticínios [Adaptado de Cascaes, 2019].....	23
Figura 3.3	Ilustração do módulo comercial LF-11 [Industrial Solar, 2020].....	25
Figura 4.1	Mapa da distribuição da irradiação direta horizontal diária em média anual e das localidades com mais de 10 indústrias de laticínios [Adaptado de Cascaes, 2019].....	37
Figura 4.2	Irradiância direta normal para Porto Alegre [SAM, 2020].....	39
Figura 4.3	Linha de tendência polinomial de quarta ordem para obtenção dos coeficientes para correção dos ângulos de incidência.....	41
Figura 4.4	Dimensões do receptor [SAM, 2020 e SCHOTT, 2020].....	43
Figura 4.5	Relação de DNI e área necessária para as cidades avaliadas.....	47
Figura 4.6	Mapa de temperaturas para Porto Alegre.....	48
Figura 4.7	Horas de operação em regime de circulação, fornecimento parcial e fornecimento integral de energia.....	52

Figura 4.8	Energia auxiliar demandada.....	53
Figura 4.9	Evolução do VPL para as cidades estudadas.....	59
Figura 4.10	Sensibilidade do VPL relativa aos parâmetros mais influentes.....	61
Figura 4.11	Detalhe da sensibilidade do VPL para cidades não vantajosas economicamente.....	62
Figura 4.12	Sensibilidade do VPL relativa à parâmetros construtivos e operacionais.....	63
Figura A.1	Gráfico referente à correção dos ângulos de incidência longitudinal e transversal [Industrial Solar, 2020].....	76

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1	Propriedades do receptor [SAM, 2020; Schott, 2020].....	26
Tabela 3.2	Dados adotados para o leite [Lima et al., 2017; Silva, 1997].....	28
Tabela 3.3	Parâmetros na condição de projeto.....	29
Tabela 3.4	Efeitos ópticos adotados para o coletor solar.....	32
Tabela 4.1	Tabela 4.1 - Cidades selecionadas e suas temperaturas ambiente em média anual.....	38
Tabela 4.2	DNI para as cidades escolhidas.....	39
Tabela 4.3	Fatores de Correção dos Ângulos de Incidência [Industrial Solar, 2020].....	41
Tabela 4.4	Coefficientes da correção do ângulo de incidência, em graus, e erros quadráticos.....	42
Tabela 4.5	Variações e características dos receptores [SAM, 2020; Schott, 2020].....	43
Tabela 4.6	Valores referentes às perdas de carga.....	45
Tabela 4.7	Perdas de carga do coletor.....	45
Tabela 4.8	Vazões mássicas da água, em kg/s.....	48
Tabela 4.9	Energia entregue ao sistema, em MWh.....	49
Tabela 4.10	Demanda mínima de energia da água, MWh.....	50
Tabela 4.11	Suprimento da demanda mínima da água.....	51
Tabela 4.12	Demanda energética do processo de aquecimento da água, MWh.....	51
Tabela 4.13	Energia anual absorvida, recebida e incidente, e eficiências dos coletores para as cidades avaliadas.....	54
Tabela 4.14	Massa de combustível, em toneladas, economizada anualmente para cada cidade.....	55
Tabela 4.15	Valores monetários economizados pelo uso do campo solar.....	57
Tabela 4.16	Valores de TIR para as cidades estudadas.....	57
Tabela 4.17	Custo nivelado de energia.....	60
Tabela 4.18	Sensibilidade do LCOE.....	64

Tabela A.1	Tabela de correção dos ângulos de incidência longitudinal e transversal [Industrial Solar, 2020].....	76
Tabela B.1	Especificações técnicas do receptor Schott PTR 70 [Schott, 2020]...	77

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AEP	<i>Anual Energy Produced</i>
BEN	Balanço Energético Nacional
CIP	<i>Clean in Place</i>
CC	<i>Capital Cost</i>
CRF	<i>Capital Recovery Factor</i>
CFF	<i>Construction Financing Factor</i>
DNI	<i>Direct Normal Irradiation</i>
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
ETC	<i>Evacuated Tube Collector</i>
FCR	<i>Fixed Charge Rate</i>
FOC	Fixed Operating Cost
FPC	<i>Flat Plate Collector</i>
HFC	<i>Heliostat Field Collector</i>
HTST	<i>High Temperature-Short Time</i>
IAM	<i>Incidence Angle Modifier</i>
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
InSun	<i>Industrial Process Heat by Solar Collectors</i>
IPCA	Índice de Preços ao Consumidor Amplo
LFR	<i>Linear Fresnel Reflector</i>
LTLT	<i>Low Temperature-Long Time</i>
LCOE	<i>Levelized Cost of Energy</i>
LCUTE	<i>Levelizes Cost of Useful Thermal Energy</i>
NREL	<i>National Renewable Energy Laboratory</i>
O&M	Operação e Manutenção
PDR	<i>Parabolic Dish Reflector</i>
PTC	<i>Parabolic Trough Collector</i>

PROMEC	Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
PCI	Poder Calorífico Inferior
PFF	<i>Project Financing Factor</i>
SAM	<i>System Advisor Model</i>
SolarPACES	<i>Solar Power &amp; Chemical Engineering Systems</i>
SHIP	<i>Solar Heat for Industrial Processes</i>
TIR	Taxa Interna de Retorno
TMA	Taxa Mínima de Atratividade
TMY	<i>Typical Meteorological Year</i>
UHT	<i>Ultra High Temperature</i>
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
VOC	<i>Variable Operating Cost</i>
VPL	Valor Presente Líquido

## LISTA DE SÍMBOLOS

### Símbolos Latinos

$A_{módulo}$	Área de um módulo, m <sup>2</sup>
$A_{seção}$	Área de uma seção, m <sup>2</sup>
$c_{p,água}$	Calor específico da água, kJ/kgK
$c_{p,leite}$	Calor específico do leite, kJ/kgK
$C_0$	Primeira constante das equações polinomiais dos ângulos de incidência
$C_1$	Segunda constante das equações polinomiais dos ângulos de incidência
$C_2$	Terceira constante das equações polinomiais dos ângulos de incidência
$C_3$	Quarta constante das equações polinomiais dos ângulos de incidência
$C_4$	Quinta constante das equações polinomiais dos ângulos de incidência
$D_i$	Diâmetro interno do receptor, m
$\Delta P_{laminar}$	Perda de carga em regime laminar, m
$\Delta P_{localizada}$	Perda de carga localizada, m
$\Delta P_{turbulento}$	Perda de carga em regime turbulento, m
$f$	Fator de atrito
$F_n$	Fluxo monetário no ano $n$ , R\$
$g$	Aceleração da gravidade, m/s <sup>2</sup>
$i$	Taxa de interesse
$I_{direta}$	Irradiância direta normal, W/m <sup>2</sup>
$i_n$	Taxa nominal de interesse
$K$	Fator de perda de carga localizada
$L_{receptor}$	Comprimento do receptor, m
$m_{água}$	Massa de água, kg
$m_{economizada}$	Massa de combustível economizada, kg
$\dot{m}_{leite}$	Vazão mássica de leite, kg/s
$\dot{m}_{loop}$	Vazão mássica de água no <i>loop</i> , kg/s
$n$	Ano de análise
$N$	Duração do projeto, anos

$N_{\text{módulos}}$	Número de módulos
$PCI_{\text{combustível}}$	Poder calorífico inferior do combustível, kJ/kg
$\dot{Q}$	Potência térmica, W
$Q_{\text{absorvido}}$	Calor absorvido, J
$Q_{\text{auxiliar}}$	Energia auxiliar, J
$Q_{\text{demanda}_{\text{água}}}$	Demanda térmica da água, J
$\dot{Q}_{\text{demandado}}$	Potência térmica requerida pela pasteurização, W
$Q_{\text{entregue}}$	Energia térmica entregue ao sistema, J
$\dot{Q}_{\text{fornecido}}$	Potência térmica fornecida pelo sistema, W
$\dot{Q}_{\text{gerado}}$	Potência térmica gerada, W
$Q_{\text{incidente}}$	Energia incidente, J
$\dot{Q}_{\text{loop}}$	Potência absorvida pelo receptor, em W
$Q_{\text{total}}$	Energia total envolvida no processo, J
$Re$	Número de Reynolds
$R_L^2$	Erro quadrático médio para o ângulo de incidência longitudinal
$R_T^2$	Erro quadrático médio para o ângulo de incidência transversal
$T_{e,\text{água}}$	Temperatura de entrada da água, em °C
$T_{e,\text{leite}}$	Temperatura de entrada do leite, °C
$T_{\text{entrada}}$	Temperatura de entrada da água, °C
$T_{\text{pasteurização}}$	Temperatura de pasteurização, °C
$T_{\text{projeto}}$	Temperatura de projeto, °C
$T_{\text{saída}}$	Temperatura de saída da água, °C
$v_{\text{escoamento}}$	Velocidade da água no receptor, m/s
$\dot{V}_{\text{leite}}$	Vazão volumétrica do leite, m <sup>3</sup> /s

### Símbolos Gregos

$\varepsilon$	Rugosidade absoluta do receptor, m
$\varepsilon_{\text{relativa}}$	Rugosidade relativa do receptor



$\eta_{total}$	Eficiência total do coletor solar
$\eta_{loop}$	Eficiência geral do loop
$\eta_{\acute{o}ptica}$	Eficiência ótica do coletor
$\eta_{t\acute{e}rmica}$	Eficiência térmica do coletor
$\phi_L$	Ângulo de incidência longitudinal
$\phi_T$	Ângulo de incidência trasnversal
$\rho_{leite}$	Massa específica do leite, kg/m <sup>3</sup>
$\nu_{\acute{a}gua}$	Viscosidade dinâmica da água, kg/(m s)

### **Símbolos Monetários**

€	Euro
¥	Remimbi
₹	Rupia indiana

## 1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos o uso da energia solar tem crescido de forma significativa, sendo usado tanto para aquecer fluidos de trabalho (conversão térmica), quanto para geração de energia elétrica (conversão fotoelétrica). A capacidade mundial instalada aumentou 14 vezes na última década [IRENA, 2020]. Devido à sua versatilidade, seu uso é indicado desde uso residencial até grandes aplicações, como indústrias e usinas de energia solar (fotovoltaica ou termossolar).

A conversão térmica é realizada por meio de coletores solares, que são um tipo especial de trocador de calor [Kalogirou, 2016]. Os dois tipos existentes são, basicamente, coletores não concentradores e concentradores. O primeiro tipo é mais simples e atinge temperaturas mais baixas, entre 30 e 200 °C. Os concentradores são mais complexos e atingem temperaturas de 60 a 2000 °C. A escolha de modelo dependerá da aplicação e da temperatura desejada para o fluido de trabalho.

No setor industrial, cerca de dois terços da energia demandada é destinada ao aquecimento de fluidos ou processos de geração de calor [Kempener et al., 2015]. Aproximadamente 60% dos processos envolvem fluidos com temperaturas abaixo de 250 °C [Pietruschka et al., 2012]. Fica evidente, então, o potencial do uso de energia solar térmica para aplicações industriais – *Solar Heat for Industrial Processes*, SHIP. Como exemplo, cita-se a Alemanha, onde Lauterbach et al., 2012, determinaram um potencial técnico de aproximadamente 16 TWh por ano. O fator limitante para instalação de um sistema solar no setor de laticínios e cervejaria, conforme observado por Müller et al., 2014, foi a área disponível para montagem do mesmo.

Segundo Farjana et al., 2018, os países que se destacam com uso de SHIP são Índia, Áustria, Alemanha, EUA, Espanha, China, África do Sul, México, França e Grécia. Nestes países, os setores industriais mais proeminentes são agricultura, comida, bebidas e têxtil. Estudos similares ao de Lauterbach et al., 2012, foram desenvolvidos para Índia [Suresh e Rao, 2017], China [Jia et al., 2018] e Grécia [Karagiorgas et al., 2001]. Entretanto, existem poucos estudos sobre o uso de SHIP nas indústrias brasileiras, e nenhum é tão detalhado quando os acima citados.

O Brasil é o quinto maior país do mundo, e rico em recursos naturais. Apresenta uma rede hídrica de grande porte, possui extensas áreas propícias para agricultura e pecuária, e também dispõe de recurso solar vantajoso. Devido a essas características, sua matriz energética

conta com uma porcentagem de participação de fontes renováveis superior à média global, 43,5% contra 14% [EPE, 2019]. Os recursos renováveis de maior presença nessa matriz são os derivados de cana (17,4%) e hídrico (12,6%), conforme o Balanço Energético Nacional (BEN) [EPE, 2019].

Apesar de a matriz energética brasileira ser consideravelmente renovável, 66,22%, desta parcela é composta por duas fontes, deixando essa geração vulnerável a safra de cana e regime de chuvas. Uma alternativa de diversificação é a utilização de energia solar, que cresceu em 10 vezes sua presença na geração nacional de 2017 para 2018 [EPE, 2018].

De acordo com o relatório síntese do BEN [EPE, 2019], as indústrias consomem o equivalente a 31,7% da energia gerada, valor que é semelhante a outros países [Kempener et al., 2015]. No setor de alimentos e bebidas, por exemplo, grande parte da energia consumida (89,86%) é destinada à geração de calor [Cascaes, 2019]. Especificamente, no setor de laticínios, Lima et al., 2018, identificaram a lenha como sendo a principal fonte de geração de calor, equivalente a 86,5% do total.

Com base nisso, a diversificação das fontes de energia no ramo industrial brasileiro se mostra vantajosa no sentido de evitar a dependência de uma fonte específica. Somado ao potencial de utilização solar térmica no setor industrial e o recurso solar no país, tem-se que esta é uma opção viável.

O presente estudo avaliou um sistema de aquecimento solar do tipo linear Fresnel, com demanda térmica referente ao processo de pasteurização do tipo leite. Foram adotadas cidades brasileiras com irradiação diária média normal superiores à 3500 MWh/m<sup>2</sup> e presença acima de 10 indústrias de laticínios.

Este trabalho tem como motivação a busca por uma alternativa para diversificar as fontes de energia da indústria brasileira. Também, há o intuito de expandir a visibilidade da aplicação de energia solar térmica.

Inicialmente foram selecionadas cidades brasileiras que respeitavam os critérios definidos, utilizando o Atlas de Brasileiro de Energia Solar [INPE, 2017] e o mapa apresentado por Cascaes, 2019. Com base no processo de pasteurização de leite, uma demanda térmica foi determinada. Os parâmetros térmicos foram obtidos por simulações realizadas no *software* SAM. Sabendo as quantidades de energia envolvidas no aquecimento de água, foi determinada a biomassa que poderia ser economizada devido à inserção do sistema. Uma análise econômica

será realizada utilizando como métrica o VPL, TIR, *payback* e LCOE. Por fim, uma análise de sensibilidade será feita para o VPL e TIR.

## 1.1 Revisão Bibliográfica

Para o processo de pasteurização de leite, as indústrias de laticínios requerem um *boiler* ou um trocador de calor. O objetivo do artigo de revisão de Panchal et al., 2018, foi de apresentar trabalhos de pesquisa, conduzido por outros pesquisadores, sobre o uso de energia solar na pasteurização do leite. Em resumo, os autores concluíram que coletores do tipo tubo evacuado são a melhor opção para sistemas de pasteurização utilizando sistemas de aquecimento solar, pois atingem temperaturas mais altas, e mais rapidamente, que os coletores do tipo placa plana. Embora não sejam obtidas com precisão, o que é desejável. Assim, para o controle da temperatura do processo o tubo evacuado não é tão bom quanto o coletor do tipo placa plana.

De acordo com Müller et al., 2014, o fator mais importante para determinar o potencial do uso de energia solar térmica é a área disponível nos telhados. Neste sentido, eles desenvolveram uma metodologia para avaliar diferentes tipos de telhados. Os critérios considerados foram os seguintes: inclinação e orientação, sombreamento, área contínua (sem obstruções) e o número de construções disponíveis. Prédios com alturas diferentes impedem a instalação de coletores maiores, e uma grande quantidade de prédios resulta em menos espaços para as fileiras de coletores. Estes fatores são ponderados e, como resultado, foram determinados coeficientes para a caracterização e classificação das áreas.

Sharma et al., 2017, avaliaram o potencial da aplicação de energia solar térmica na indústria de laticínios. Primeiramente, estimaram a carga térmica do processamento de leite e determinaram a irradiação solar disponível. Após, avaliaram a performance de um sistema de SHIP em diferentes regiões da Índia. Por fim, estimaram o potencial de redução dos gases de efeito estufa. Eles estimaram que de 20 a 30% da demanda térmica deste setor pode ser suprida por sistemas de aquecimento solar, sem a necessidade de reservatório térmico. Como exemplo, para locais no estado de Gujarate, Índia, com irradiação direta normal de 600 W/m<sup>2</sup>, estimaram uma redução de 15.000 toneladas em emissões de CO<sub>2</sub>.

Atualmente, a Índia é um dos maiores produtores de leite do mundo, produzindo aproximadamente 119 GL por ano. Desai et al., 2013, apresentaram diferentes opções de

aplicação para uso de energia solar na indústria indiana de laticínios, desde refrigeração até a iluminação de escritórios e instalações. De acordo com os autores, o aquecimento solar de água apresenta presença significativa nas aplicações industriais térmicas, pois é considerado a opção de melhor custo-benefício. Este aquecimento pode ser usado para diversos processos de temperaturas médias, como lavagem, limpeza, pasteurização, secagem, entre outros. Ao final, concluem que os usos de energia solar na indústria de laticínios costumam ser os seguintes: fornecimento de água quente para o vaporizador, aquecimento de água para processamento de leite ou para sistema de lavagem *Clean in Place* (CIP).

Em [Suresh e Rao, 2017] foi analisado o uso de energia solar em alguns setores da indústria. Foram identificados processos que empregam essa tecnologia, as faixas de temperatura de operação, a carga térmica, a área necessária para os coletores, o custo inicial e o período de retorno. Para a indústria de laticínios, os autores estimaram a geração de 0,49 PJ de energia térmica, para uma área de 0,16 milhões de m<sup>2</sup> e custo inicial de US\$ 25 milhões. A utilização de sistemas de aquecimento solar seria capaz de reduzir em 12,9 ktep os 64,6 ktep de óleo combustível atualmente solicitados.

O projeto FP7 da *Industrial Process Heat by Solar Collectors* (InSun) visava demonstrar o potencial e as variedades do processo de aquecimento solar térmico. Para tal, Pietruschka et al., 2012, apresentaram sistemas aplicados a três parceiros do projeto: uma indústria do setor de carne, uma de laticínios e uma de construção civil. A indústria de laticínios situa-se na Espanha, e produz diversos derivados de leite. Seu principal consumo está no processo de secagem do leite, e a demanda térmica diária geral é de 1,5 MWh. Um campo solar com 2.040 m<sup>2</sup> de coletores parabólicos foi projetado, a fim de aquecer óleo térmico até 200 °C. O ar utilizado no sistema de secagem é aquecido até 185 °C por meio do vapor gerado pelo óleo aquecido. A geração prevista para este sistema é de 1.064 MWh/ano, suficiente para economizar cerca de 120.000 m<sup>3</sup>/ano de gás combustível.

Das etapas presentes no processamento do leite, a secagem industrial consome, em média, 12% da energia demandada [Pirasteh et al., 2014]. Em seu trabalho, os autores verificaram a utilização de secagem em alguns setores da indústria, bem como para a de laticínios. Este processo é importante na manufatura de produtos secundários como *whey*, leite em pó e caseína (proteína presente no leite, fundamental para a nutrição de lactentes). No secador por *spray*, ar quente a 200 °C retira a umidade e transforma o leite líquido em leite em pó. Apesar de coletores parabólicos fornecerem temperaturas próximas a 250 °C, coletores

planos e de tubo evacuado são opções viáveis. Financeiramente, os autores mencionaram a viabilidade econômica do uso de energia solar térmica apresentando tempos de retorno de menos de um ano até um máximo de 10 anos.

Reforçando a diversidade na utilização de energia solar térmica, um modelo diferenciado de coletor é analisado por Li et al., 2017. O dispositivo estudado é semelhante a um coletor tipo placa plana. A diferença é que há reservatórios térmicos embutidos. Esta configuração é bastante compacta, indicada para uso em telhados. O sistema foi utilizado em um estudo de caso para uma indústria de laticínios, na qual se utiliza temperaturas de 120 a 150 °C na produção de leite em pó. A demanda diária é de 500 kWh. Segundo os autores, apesar de o custo aumentar em 10% com a presença dos reservatórios embutidos, a geração de energia térmica pode aumentar em 20%. Para o estudo de caso realizado, frações solares entre 0,35 e 0,60 foram obtidas. Dessa forma, apresentam-se como uma alternativa viável para utilização de energia solar térmica na indústria. Ressaltam, entretanto, que esta é uma tecnologia relativamente nova. Assim mais pesquisas e redução de custos com produção em larga escala podem melhorar a viabilidade econômica deste dispositivo.

Uma visão geral das aplicações de aquecimento solar na indústria é apresentada por Allouhi et al., 2017, destacando os principais processos e suas faixas de temperatura de operação. Para demonstrar a viabilidade de um sistema de aquecimento solar, um estudo de caso foi realizado para uma indústria de processamento de leite. O sistema de aquecimento de água proposto por eles foi introduzido, visando a redução no uso de óleo como combustível. Além disso, o sistema foi dimensionado para prover água quente para quatro processos simultaneamente, cada qual com sua demanda de energia específica. Após escolhido o coletor mais vantajoso, traçado o perfil energético dos processos e analisados os dados climáticos, simulações foram realizadas com uso do software TRANSOL. A configuração ótima encontrada foi de 400 m<sup>2</sup> de coletores de tubo evacuado inclinados a 30°, com um tanque de armazenamento com 2.000 litros. Uma fração solar de aproximadamente 41% foi atingida, e o tempo de retorno ficou em 12,3 anos. Contudo, este período é consideravelmente suscetível às taxas de juros e ao investimento inicial.

A aceitação e a difusão da tecnologia solar térmica dependem também da atratividade financeira para os usuários. Para tal, Sharma et al., 2018, selecionaram sete localidades da Índia para avaliar aspectos econômicos de SHIP aplicados na indústria de laticínios, com e sem reservatório térmico. A demanda térmica de água a 184 °C e 10,55 bar foi considerada, e o

coletor parabólico foi escolhido. Variando o valor da irradiância direta normal entre 600 e 800 W/m<sup>2</sup>, foi possível determinar a área de coletores necessária, a energia gerada e, assim, os parâmetros econômicos como LCUTE (*levelized cost of useful thermal energy*). Os autores encontraram uma fração solar entre 0,16 e 0,27. Para os SHIP chegaram a valores em rúpias equivalentes à faixa de R\$ 71,72/GJ e R\$ 105,83/GJ, maiores que para fontes não renováveis – R\$ 62,06/GJ a R\$ 91,33/GJ (Cotação da rúpia de R\$ 0,007, 25/06/2020). Com tempos de retorno em torno de 20 anos, estes sistemas não se mostraram viáveis para o cenário da Índia. Assim, salientam que se fazem necessárias medidas de incentivo para este tipo de tecnologia.

Diversos estudos relacionados ao coletor solar linear Fresnel foram realizados. A performance de um sistema de geração de vapor foi apresentada por Wagner e Zhu (2012), para uma planta com capacidade nominal de 107 MW de eletricidade. Sua análise foi desenvolvida utilizando o software *System Advisor Model* (SAM), onde simularam sistemas com configurações de recirculação, recirculação acrescida de um módulo na seção de superaquecimento e outra com passagem única. Na comparação dos três modos, encontraram resultados melhores para configuração de passagem única – geração líquida de 228.170 MW e fator de capacidade de 25,9%.

Outras análises verificando o desempenho de sistemas Linear Fresnel foram conduzidas para o Paquistão [Liaqat et al., 2019], Porto Rico [Adarme-Mejia e Irizarry-Rivera, 2015], Índia [Bishoyi e Sudhakar, 2017; Singh et al., 1999] e Argentina [Dellicompagni e Franco, 2019]. No Brasil, há um trabalho ainda em desenvolvimento, do qual os testes iniciais indicam que a geração direta de vapor através de um coletor solar tipo Linear Fresnel pode ser viável [Pigozzo Filho et al., 2018].

## **1.2 Objetivo Principal**

Determinar o desempenho térmico e financeiro de um sistema de aquecimento solar de água utilizando coletores do tipo linear Fresnel para diferentes cidades do Brasil.

### **1.2.1 Objetivos Específicos**

- Selecionar as regiões que atendam os requisitos propostos;

- Determinar a demanda de energia térmica para um determinado processo industrial (pasteurização);
- Simular o sistema de aquecimento solar no software SAM para cada cidade selecionada;
- Realizar a avaliação térmica;
- Determinar a porcentagem de energia entregue pelo sistema;
- Realizar a análise financeira e de sensibilidade para cada cidade selecionada.

### **1.3 Organização do Trabalho**

O Capítulo 1 traz a introdução e a revisão bibliográfica, nos quais são expostos a motivação e a relevância do presente estudo. O Capítulo 2 apresenta alguns aspectos gerais sobre o coletor solar do tipo linear Fresnel, sobre a pasteurização do leite e sobre o *software* utilizado. No Capítulo 3 encontra-se a metodologia utilizada, descrevendo-se os passos seguidos e as considerações feitas. O Capítulo 4 contém os resultados obtidos e as discussões acerca dos mesmos. Por fim, o Capítulo 5 apresenta as conclusões, bem como as sugestões de trabalhos futuros.



## 2 ASPECTOS GERAIS E CONCEITOS IMPORTANTES

### 2.1 Coletores Solares

O principal componente de um sistema de aquecimento solar (SAS) é o coletor. Ele funciona como um trocador de calor [Panchal et al., 2018], que transfere a energia radiante oriunda do Sol para um fluido de trabalho. Conseqüentemente, este fluido aumenta sua temperatura, podendo ser usado no aquecimento de outro fluido (água ou ar), ou também ser depositado em um reservatório térmico, para ser utilizado à noite ou em períodos de baixa irradiação [Jamar et al., 2016].

Os coletores são classificados basicamente como não concentradores e concentradores. Esta classificação diz respeito à característica de sua configuração concentrar, ou não, os raios solares em um determinado ponto ou eixo. Os coletores não concentradores costumam ser mais simples e atingem baixas temperaturas. Os coletores concentradores, usualmente apresentam um sistema de rastreamento do Sol. Por isso, apesar de serem mais complexos, são capazes de atingir temperaturas bem mais elevadas.

Os principais coletores não concentradores são o coletor de placa plana (*flat plate collector*, FPC) e o coletor de tubo evacuado (*evacuated tube collector*, ETC). O coletor de placa plana consiste em um equipamento plano, onde a radiação passa pela cobertura transparente e atinge uma placa absorvedora, que transmite a energia para aquecimento do fluido que passa através do coletor. São os coletores mais simples, atingindo temperaturas que variam num intervalo entre 30 e 80 °C. Quanto aos ETC, a absorção é realizada dentro de tubos, onde há um material de alta absorvidade em um meio evacuado. São capazes de fornecer água aquecida a temperaturas entre 50 e 200 °C. Destes, o ETC absorve melhor a componente difusa da radiação solar, porém não apresenta a mesma precisão do FPC no controle da temperatura [Panchal et al., 2018].

Os coletores concentradores apresentam absorvedores tubular ou pontual. Coletores parabólicos em calha (*parabolic trough collector*, PTC) e coletores do tipo linear Fresnel (*linear Fresnel reflector*, LFR) são os principais exemplos de coletores tubulares. Ambos apresentam um sistema de rastreamento solar que opera em um único eixo. O PTC é constituído de um espelho em formato parabólico, que reflete os raios solares para um tubo por onde passa o fluido de trabalho. O LFR opera de forma semelhante, porém os agentes concentradores são linhas de

espelhos planos ou levemente curvados. Atingem faixas de temperatura entre 60 e 400 °C (PTC) e 60 e 250 °C (LFR).

Como exemplos de sistemas com absorvedores pontuais, cita-se o refletor em disco parabólico (*parabolic dish reflector*, PDR) e coletor de campo heliostático (*heliostat field collector*, HFC). Estes apresentam sistemas de rastreamento solar em dois eixos, sendo os mais complexos de todos. O PDR é formado por um disco espelhado que concentra a radiação recebida em um único ponto. Quanto ao HFC, diversos espelhos espalhados numa determinada área (campo) concentram os raios solares em um ponto situado no alto de uma torre central. Devido à concentração pontual, esses sistemas atingem altas temperaturas – entre 600 e 2.000 °C (PDR) e entre 300 e 1.500 °C (HFC).

### 2.1.1 Coletor Fresnel Linear

O LFR recebe este nome por usar o princípio da lente Fresnel, criada pelo físico Augustin-Jean Fresnel [Xie et al., 2011]. Originalmente utilizada nas luzes de faróis para navegação, ela apresenta em sua curvatura diversas seções retas, que fornecem efeito semelhante às lentes tradicionais [Günther, 2011], Figura 2.1. Dessa forma, obtém-se um elemento óptico que consome menos material, tornando-se mais leve, ao custo da qualidade de imagem das lentes [Günther, 2011]. São comumente utilizadas em faróis e faroletes de automóveis, sensores de presença para luz, semáforos, holofotes e na indústria cinematográfica [Serenar, 2015].



Figura 2.1 - Comparação entre as lentes convencional e Fresnel [Adaptado de Günther, 2011].

O LFR é formado por diversos espelhos, planos ou levemente curvados, ligeiramente espaçados e dispostos em linhas, com rotação longitudinal para rastreamento solar, conforme Figura 2.2. Os raios solares são direcionados para o absorvedor - uma tubulação central elevada do solo, por onde passa o fluido de trabalho. Acima da tubulação há uma segunda área reflexiva, com função de aumentar a quantidade de energia direcionada para o absorvedor, contribuindo para a diminuição das perdas ópticas.



Figura 2.2 - Conjunto de coletores linear Fresnel, absorvedor e refletor secundário [SolarPACES, 2020].

Apresentam dois tipos de perdas: óptica e térmica. As perdas ópticas estão relacionadas com a não concentração total dos raios incidentes no coletor e refletidos para o receptor. Deve-se à geometria do conjunto de espelhos. Por outro lado, a perda térmica se deve à transferência de calor do fluido de trabalho para o ambiente. Conforme Montes et al., 2014, as perdas ópticas são consideravelmente maiores do que as perdas térmicas para temperaturas abaixo de 400 °C.

As principais vantagens do LFR são a simplicidade e o baixo custo [Cagnoli et al., 2018], quando comparado a outros coletores concentradores. Ambas características se devem à utilização de espelhos planos, e relativamente pequenos, favorecendo a instalação e a montagem, e também ao posicionamento das fileiras de espelhos próximas ao solo, minimizando os esforços estruturais devido ao vento.

Existem alguns parâmetros que influenciam a performance do LFR. Conforme Günther, 2011, destacam-se a largura dos espelhos e do coletor como um todo, o espaçamento e a quantidade das fileiras, a altura do absorvedor, e a curvatura dos espelhos.

Fileiras muito finas implicariam a necessidade de uma maior quantidade de espelhos. Por outro lado, espelhos largos diminuiriam a eficácia do princípio de Fresnel. Quanto ao coletor inteiro, formado por diversos espelhos, tem-se que coletores mais finos direcionam menos fluxo radiante para o absorvedor.

Já em coletores mais largos, as partes mais distantes do eixo central, e por consequência mais distantes do absorvedor, apresentam menor contribuição na energia refletida, sendo mais sensíveis a efeitos ópticos. Além disso, o vidro do absorvedor apresenta baixa transmitância para ângulos de incidência consideravelmente altos.

Absorvedores distantes dos coletores (na direção vertical) apresentam o mesmo problema dos coletores largos, nos quais os espelhos ficam a uma distância maior e exercem menos influência no direcionamento da energia solar. Contudo, ao posicioná-los próximos à superfície coletora poderá ocorrer o sombreamento dos espelhos.

Não deve haver grande espaço no vão entre espelhos para evitar a presença de áreas de coletor sem elementos concentradores. Já espelhos muito próximos promovem sombreamento e bloqueio entre as fileiras. Em relação à curvatura dos espelhos, graus de curvatura extremos causam baixa concentração de energia no receptor, visto que muitos raios não são direcionados a ele. A influência de todos parâmetros descritos acima foi discutida e analisada por Günther, 2011, no qual foram avaliados sistemas com diferentes precisões de reflexão.

O LFR é utilizado no aquecimento de água e na geração de vapor. Na geração de energia elétrica, o vapor que sai do campo solar é direcionado a uma turbina, num ciclo Rankine. É possível, também, utilizar o LFR apenas para o aquecimento de água, controlando-se a temperatura e a pressão do fluido que passa através do absorvedor. Devido ao seu tamanho compacto e à leveza dos seus componentes, este tipo de coletor pode ser usado para aquecimento em pequena escala, posicionado até mesmo sobre edificações, como o caso estudado por Bayón-Cueli, 2020.

### 2.1.1.1 Modificadores de Ângulo de Incidência

Ao longo dos dias, o Sol descreve um movimento aparente em relação ao coletor. A Figura 2.3 ilustra alguns dos principais ângulos que descrevem a posição do Sol em relação ao coletor. O ângulo zênite ( $\phi_Z$ ) representa a distância angular entre o eixo vertical do ponto selecionado e a direção de incidência dos raios solares. Os ângulos de incidência transversal ( $\phi_T$ ) e de incidência longitudinal ( $\phi_L$ ) são os ângulos associados à direção da incidência solar e sua projeção nos planos  $x$ - $z$  e  $y$ - $z$ , respectivamente, descrevendo o movimento do Sol ao longo dos eixos transversal e longitudinal.

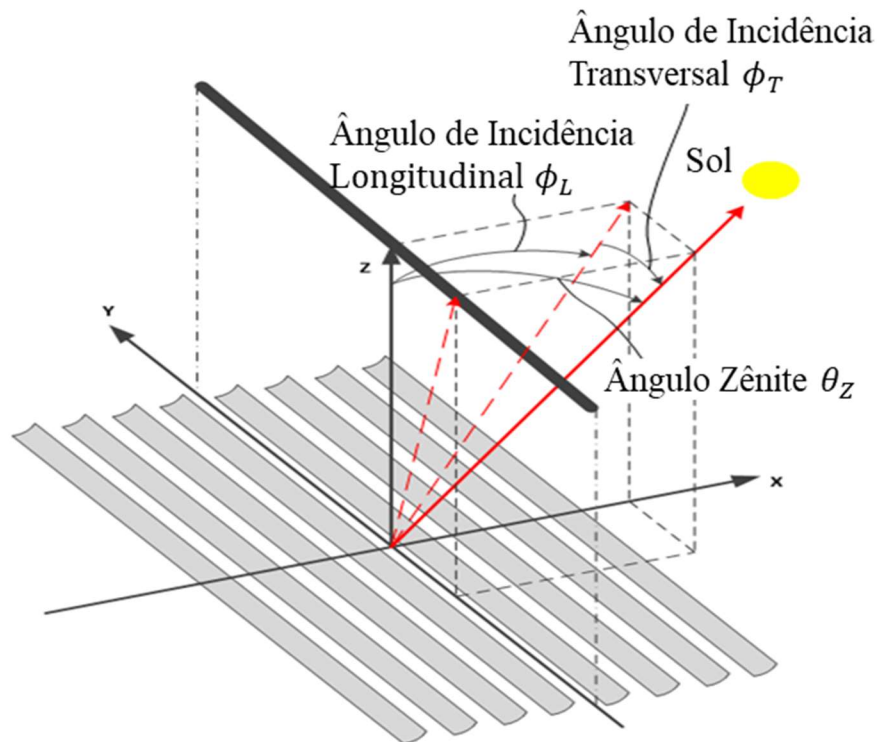


Figura 2.3 - Ângulos de incidência no coletor solar [Adaptado de SAM, 2020].

A variação destes ângulos de incidência, no decorrer do dia, implica diferenças na energia que incide no coletor. Em momentos nos quais os ângulos são pequenos, próximos de zero, os valores de incidência são máximos. Por outro lado, para valores próximos de  $90^\circ$  esses valores são praticamente nulos. No caso de coletores LFR, poderiam ocorrer incidências um

pouco maiores, mesmo ao se diminuir o ângulo transversal, pois a perspectiva do espaçamento entre espelhos diminuiria, dependendo da direção dos raios solares.

A fim de descrever o comportamento óptico de coletores solares, utilizam-se os modificadores do ângulo de incidência (*incident angle modifier*, IAM). Estes podem ser medidos experimentalmente, ou então calculados com auxílio de um *software* específico. Ao se trabalhar com módulos comerciais, estas informações podem estar presentes no catálogo do fabricante.

## 2.2 Leite

O leite é definido, segundo Decreto nº 9.579 de 22 de novembro de 2018 [Brasil, 2018], como *produto em forma líquida ou em pó, oriundo da ordenha completa, ininterrupta, em condições de higiene, de animais de todas as espécies, sadios, alimentados e descansados*. Na Instrução Normativa nº 51 de 18 de setembro de 2002 [Brasil, 2002] são feitas diversas classificações do leite em termos: da finalidade, da espécie produtora, do teor de gordura e do tratamento. O leite pasteurizado é dividido nos tipos A, B e C, os quais se referem ao grau de higienização de seu processamento - do maior, A, para o menor, C.

Com relação aos tratamentos realizados, o leite pode ser classificado como [Baptista e Pinto, 2018]:

- i. Cru: leite parcialmente, ou não, submetido às operações de filtração, refrigeração, congelamento ou preaquecimento;
- ii. Pasteurizado: submetido à filtração e, então, ao aquecimento a 74 °C, por dezesseis segundos, seguido de refrigeração a 4 °C até o momento de seu consumo;
- iii. Constituído: produto resultante da dissolução em água do leite em pó adicionado, ou não, de gordura láctea até atingir o teor gorduroso fixado para o respectivo tipo, seguido de homogeneização e de pasteurização
- iv. Ultra pasteurizado: aquecimento a 147 °C por dezesseis segundos, seguido de refrigeração a 20 °C. O leite é mantido em observação por sete dias, antes de sua comercialização.

Diversos produtos são processados na indústria de laticínios, conforme sumarizado por Ramírez et al., 2006. Destacam-se como principais o leite líquido (integral, semidesnatado e

desnatado), derivados de leite fresco (manteiga, creme de leite, iogurte e outros fermentados), queijos, leite condensado, e produtos de leite seco (leite em pó, *whey*, caseína).

### 2.2.1 Pasteurização

O leite cru, retirado diretamente dos animais, apresenta certos tipos de bactérias e elementos patogênicos que, ao se desenvolverem, tornam o leite inconsumível para os humanos [Walstra et al., 2003]. Um dos tratamentos térmicos utilizados para prevenir o desenvolvimento desses elementos é a pasteurização. Trata-se de um processo que consiste em aquecer e manter o leite a uma determinada temperatura [Elizondo-Salazar et al., 2013]. Este tratamento elimina a maioria das bactérias, sem promover perda nutricional significativa [Rahman, 2007]. Visto que alguns agentes biológicos podem permanecer no leite, diferente do que acontece na esterilização, faz-se necessário a utilização de métodos que garantam a sua preservação, como a refrigeração, por exemplo [Sun, 2012].

Existem essencialmente três modos de realizar esse processo. São eles: a pasteurização lenta, a pasteurização rápida e pasteurização super-rápida. O processo de pasteurização lenta (*low temperature-long time*, LTLT) consiste em manter o leite aquecido a cerca de 63 °C por trinta minutos [Meunier-goddik, 2016]. É um processo não contínuo, onde certa quantidade do leite é aquecida de cada vez. O equipamento possui um misturador que funciona constantemente, para promover aquecimento homogêneo [Elizondo-Salazar et al., 2013]. Apesar de utilizar um equipamento mais simples em relação aos outros, é um processo lento e pouco eficiente [Meunier-goddik, 2016].

O processo de pasteurização rápida de leite (*high temperature-short time*, HTST) é realizado de forma contínua por meio de trocadores de calor, geralmente de trocadores de calor do tipo placas [Rahman, 2007]. Nesse equipamento, o leite é aquecido a 74 °C e mantido nesta temperatura por dezesseis segundos e, então, resfriado, de acordo com previsto na I.N. nº 51/2002 [Brasil, 2002]. Trata-se de um processo mais eficiente, pois apresenta uma seção de regeneração, onde o leite que já passou pelo trocador de calor eleva a temperatura do leite que está entrando no mesmo. Eficiências em torno de 90%, na seção de regeneração, são usualmente obtidas, tornando a eficiência energética outra vantagem da LTLT [Meunier-goddik, 2016].

O terceiro processo (*ultra high temperatura*, UHT) é o mais rápido. Nesse, aquece-se o leite a cerca de 140 °C por aproximadamente dois segundos [Meunier-goddik, 2016]. Visto que

a temperatura alcançada é superior à temperatura de vaporização à pressão atmosférica, i.e., 100,16 °C, torna-se necessário aplicar uma pressão de pelo menos 3,2 bar, ou 3,16 atm., para prevenir a vaporização [Dhotre, 2014]. O equipamento utilizado é semelhante ao equipamento utilizado no HTST, porém com uma seção de retenção menor [Rahman, 2007]. Este método é vantajoso por sua maior eficiência na eliminação das bactérias e pela melhora significativa na textura de sorvetes [Rahman, 2007]. Contudo, o método mais utilizado atualmente ainda é o HTST.

### 2.3 Pasteurizador

Segundo Dhotre, 2014, para processos contínuos de pasteurização são necessários, basicamente, um trocador de calor, uma seção de retenção, mecanismos de aquecimento e refrigeração, válvulas de desvio de fluxo e contrapressão, e uma bomba. Ainda, segundo o autor, pasteurizadores comerciais, Figura 2.4a, costumam ter componentes adicionais, a fim de melhorar sua operação, a qualidade do leite e a eficiência energética.

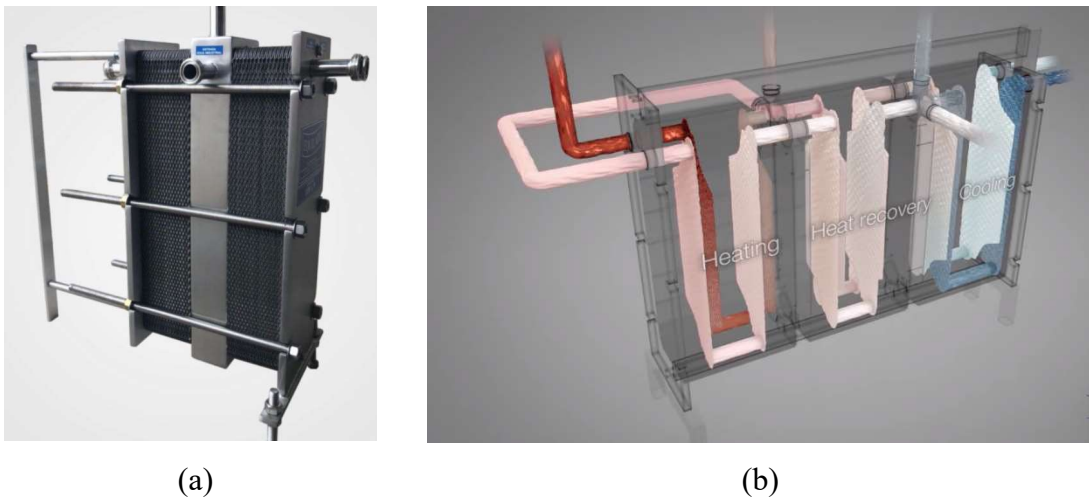


Figura 2.4 – Equipamento utilizado na pasteurização do leite: (a) pasteurizador tipo trocador de calor tipo placas planas [Equilati, 2020] (b) ilustração do princípio de funcionamento de um trocador de calor tipo placas planas [Alfa Laval, 2020a].

Conforme Rahman, 2007, o principal equipamento no processo de pasteurização rápida (HTST) é o trocador de calor de placas, Figura 2.4a. O mesmo consiste em diversas placas dispostas próximas umas das outras, e em quatro aberturas, que servem de entrada e saída para



os fluidos quente e frio [Thulukkanam, 2013], conforme ilustrado na Figura 2.4b. As placas apresentam ondulações feitas por estampagem, que geram turbulência e assim aumentam a taxa de transferência de calor [Dhotre, 2014]. Sua configuração fornece, assim, uma opção compacta para troca de calor.

## 2.4 *System Advisor Model (SAM)*

O *National Renewable Energy Laboratory* (NREL) desenvolveu, com fundos do Departamento de Energia (DOE) dos EUA, um *software* livre para auxiliar na análise de sistemas que utilizam fontes de energia renovável. O *System Advisor Model (SAM)* [NREL, 2017] facilita a simulação e a análise tecno-econômica de geração de energia, contando com modelos que englobam sistemas de geração de energia fotovoltaica, geotérmica, biomassa, entre outros.

As simulações são realizadas em base horária, em regime *quasi*-permanente, utilizando arquivos climáticos, e parâmetros do sistema, calculados em passos de tempo anteriores [Wagner e Zhu, 2012]. Os cálculos realizados utilizam valores fornecidos pelo usuário juntamente com dados meteorológicos provenientes do arquivo climático. Nesses arquivos, comumente em formato TMY, encontram-se informações como temperaturas de bulbo seco e úmido, velocidade do vento e irradiação solar do local escolhido [Duffie e Beckman, 2013]. O arquivo climático pode conter dados com base na série histórica do local ou, então, apresentar valores correspondentes a um ano específico.

Existem diversos resultados que podem ser obtidos por meio do SAM, a depender do modelo empregado. Alguns exemplos são os seguintes: temperaturas (na entrada e saída do sistema), irradiação (incidente e absorvida), energia elétrica (gerada, necessária para bombeamento) e energia térmica (gerada, dissipada).

Os dados extraídos podem ser apresentados de formas variadas, como tabelas detalhadas por hora, gráficos e séries temporais. Esses resultados são facilmente exportados para outros programas, em especial o Excel, que facilita a organização, análise e comparação dos mesmos. O SAM apresenta um intercâmbio de informações, especificamente com o Excel, onde é possível utilizar valores de uma planilha como entrada no SAM ou também mandar os valores das saídas da simulação para uma planilha.

Complementarmente aos resultados obtidos pela simulação, há as opções de análise paramétrica, estocástica e P50/P90. Na parametrização é possível verificar a influência de parâmetros, que o usuário deseja, nos dados de saída, sendo útil em processos de otimização. A análise estocástica é similar a paramétrica. Porém, os valores de entrada são gerados automaticamente com base em uma faixa e distribuição de probabilidade fornecidas pelo usuário. Quanto a P50/P90, dados climáticos de diversos anos são utilizados e comparados para mostrar quais valores apresentam maior probabilidade de ocorrência.

#### **2.4.1 Modelo Utilizado: *Process Heat Linear Direct Steam***

Entre os modelos disponíveis no SAM, dois desses foram desenvolvidos para a análise de sistemas de geração de energia térmica para aplicações industriais. A principal diferença entre estes está na tecnologia empregada. Um desses modelos utiliza coletores parabólicos (PTR), enquanto o outro utiliza coletores do tipo Linear Fresnel (LFR). No presente trabalho, optou-se pela segunda opção, denominada *process heat linear direct steam*.

O campo solar é composto por diversas seções, ou *loops*, de coletores solares dispostos em paralelo, Figura 2.5. Dentro de cada seção, os módulos estão montados em série, por onde a água se desloca e é aquecida por meio da concentração dos raios solares. O SAM divide o campo solar em nós, calculando as características ópticas e térmicas com base em informações da geometria e das condições locais [Wagner e Zhu, 2012].

Nos períodos em que a temperatura de saída é inferior à temperatura de projeto, definida pelo usuário, a água recircula pelo campo solar, de maneira que a temperatura de entrada possui o mesmo valor da temperatura de saída da hora anterior. Assim, a água só é enviada para a aplicação nas horas em que essa temperatura de saída é igual ou superior à temperatura de projeto.

A caracterização óptica do LFR pode ser feita por meio de uma tabela solar, com informações referentes aos ângulos azimute e zênite. Também, pode se utilizar uma tabela referente aos ângulos longitudinais e transversais. Ainda, como alternativa ao uso de tabelas, há a possibilidade do uso de equações polinomiais para expressar o comportamento óptico em função da variação destes ângulos.

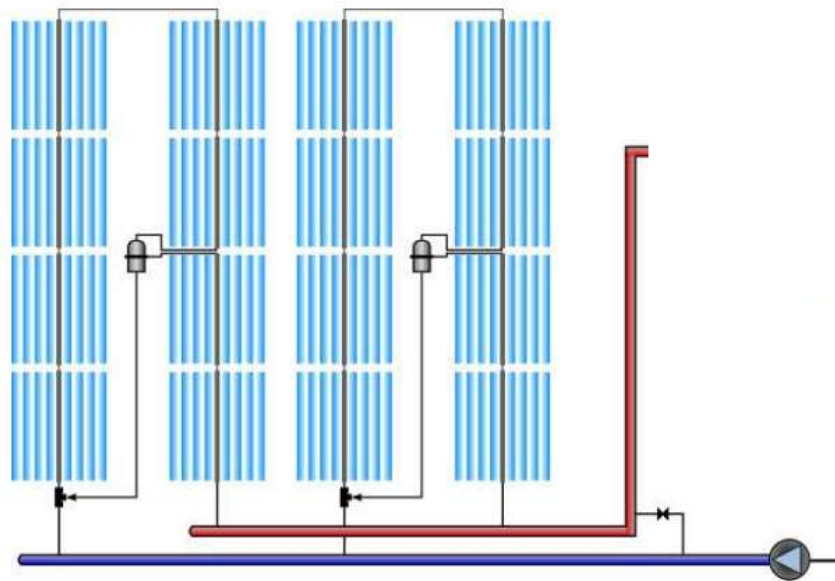


Figura 2.5 - Ilustração simplificada de um campo solar com dois loops em paralelo [Adaptado de Wagner, 2012].

A configuração do receptor pode variar, dependendo do fabricante e das condições de saída do vapor. Assim, segundo Wagner e Zhu, 2012, o SAM apresenta a opção de descrever a performance térmica do receptor de uma forma mais geral, que depende da diferença entre a temperatura ambiente e a de vapor, bem como da velocidade do vento. Porém, há a possibilidade de utilizar uma representação mais completa, modelando um tubo evacuado, conforme descrito por Foristall, 2003.

Uma visão geral da tela inicial é mostrada na Figura 2.6, com as abas presentes em destaque. Inicialmente o usuário escolhe, em *Location and Resource*, o arquivo climático referente ao local de estudo. Na aba *System Design* estão presentes os valores iniciais do sistema, como características principais de sua aplicação. Os principais parâmetros do campo solar encontram-se em *Solar Field*, que contém informações sobre a área utilizada e as condições do fluido de trabalho. Finalizando a caracterização técnica, a aba *Collector and Receiver* apresenta as dimensões dos coletores e do receptor, bem como aspectos ópticos. Por fim, a análise financeira é realizada com base em *Financial Parameters*, que calcula o custo nivelado de energia (*Levelized Cost of Energy*, LCOE).

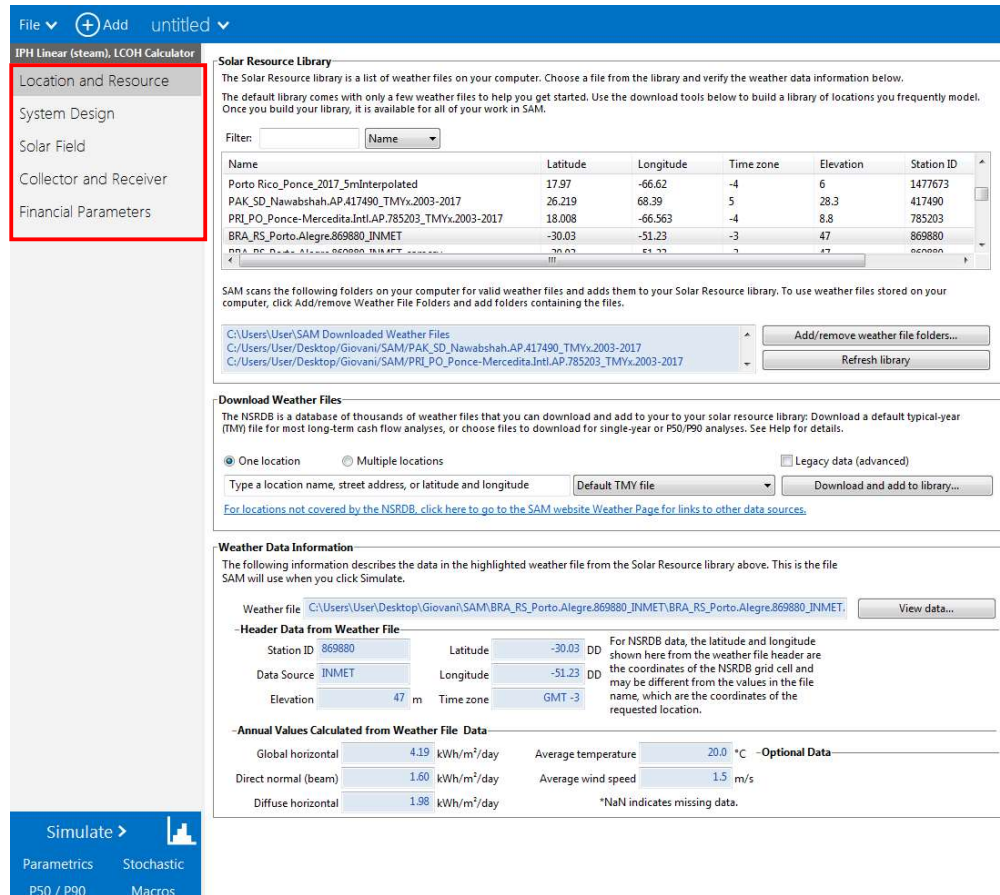


Figura 2.6 - Página inicial do modelo adotado [Adaptado de SAM, 2020].

## 2.5 Análise Econômica

Além da viabilidade técnica da execução de um projeto, é importante analisar a viabilidade econômica do mesmo. Isto se faz necessário porque o valor monetário é capaz de gerar interesse e atrair a atenção de pessoas e de entidades capazes de promover sua implementação. Existem diferentes métodos de análises financeiras de um projeto, conforme apresentado por Short et al., 1995 e por Packey, 1993.

### 2.5.1 Valor Presente Líquido

Um dos modelos mais adotados é o Valor Presente Líquido (VPL), que permite a contabilização simultânea das entradas e saídas no fluxo de caixa. O princípio deste método é verificar os custos e os lucros ao longo do período de análise, quantificando o quanto estes valores representam nos dias de hoje. Para isso utiliza-se a seguinte relação

$$VPL = \sum_{n=0}^N \frac{F_n}{(1+i)^n} = F_0 + \frac{F_1}{(1+i)^1} + \frac{F_2}{(1+i)^2} + \dots + \frac{F_N}{(1+i)^N} \quad (2.1)$$

na qual  $VPL$  é o valor presente líquido, em R\$,  $n$  é o ano em análise,  $N$  é período total do projeto,  $F_n$  é o fluxo de caixa, em R\$, no ano  $n$ , e  $i$  é a taxa de interesse, ou taxa mínima de atratividade (TMA). Considera-se vantajoso economicamente somente os valores positivos de VPL. Os valores negativos indicam que os lucros previstos não são compensatórios frente aos custos e investimentos. Para VPL nulos a implementação do projeto é indiferente em termos financeiros.

### 2.5.2 Tempo de Retorno

Enquanto o VPL representa o valor do fluxo de caixa futuro no tempo presente, o *payback* indica o período de retorno do investimento inicial. Basicamente, ele informa em que momento o somatório das entradas do fluxo de caixa excede o somatório dos gastos [Newnan et al., 2004]. O *payback* simples considera apenas os valores de entrada e saída, sem realizar qualquer tipo de desconto. Para se considerar a variação do valor do dinheiro no tempo, utiliza-se o *payback* descontado. Este método pode ser aplicado analisando a evolução do VPL de um projeto, e o tempo de retorno será o momento em que este passar de valores negativos para valores positivos.

### 2.5.2 Taxa Interna de Retorno

A fim de se obter uma referência para a TMA, é possível calcular a taxa interna de retorno, TIR. Esta taxa fornece informação sobre o rendimento mínimo necessário para uma empresa decidir realizar o investimento, ou então aplicar seu capital em outra oportunidade [Packey, 1993]. A TIR é a taxa de interesse que implica os custos se igualarem às receitas, ou seja, tornar o VPL zero [Newnan et al., 2004]. Dessa forma, a TMA escolhida deve ser comparada à TIR resultante do projeto, a fim de determinar a viabilidade do investimento.

### 2.5.3 Custo Nivelado de Energia (LCOE)

Para comparar distintas tecnologias, com diferentes custos iniciais e tamanhos, pode-se utilizar o custo nivelado de energia (*levelized cost of energy*, LCOE) [Short et al., 1995]. Este parâmetro pode realizar comparações entre geração de energias renováveis e queima de combustíveis fósseis. Um exemplo de sua aplicabilidade é seu uso pelo DOE em diversos projetos e também pela NREL [Packey, 1993]. O *software* SAM calcula o LCOE através de

$$LCOE = \frac{(FCR)(CC) + FOC}{AEP} + VOC \quad (2.2)$$

na qual *LCOE* é o custo nivelado de energia, em R\$/kWh, *FCR* é a taxa de cobrança fixa (*fixed charge rate*), *CC* é o custo de capital (*capital cost*), em R\$, *FOC* são os custos operacionais fixos (*fixed operational costs*), em R\$, *AEP* é a energia gerada anualmente (*annual energy production*), em kWh, e *VOC* são os custos operacionais variáveis (*variable operational costs*), em R\$/kWh.

A *FCR* é a relação necessária entre a receita e investimento para cobrir o investimento inicial [SAM, 2020]. Pode-se informar a taxa diretamente ou então calculá-la por meio de outros fatores, conforme

$$FCR = (CRF)(PFF)(CFF) \quad (2.3)$$

na qual, *CRF* é o fator de recuperação do capital, *PFF* é o fator de financiamento de projeto, e *CFF* é o fator de financiamento da construção.

O *CRF* é calculado considerando dados de inflação, TMA e taxa do financiamento. O *PFF* é uma função dos impostos e da depreciação, que pode ser considerada como um valor único ou então receber valores em uma tabela. O *CFF* é função dos custos de construção, da taxação de impostos e taxas do financiamento da construção.

### 3 METODOLOGIA

O fluxograma abaixo, Figura 3.1, ilustra a metodologia utilizada. Inicialmente, com base nos valores de irradiação direta horizontal diária em média anual e nos dados de distribuição das indústrias de laticínios, Figura 3.2, foram selecionadas as localidades para as quais o estudo seria aplicado. Dentre os processos que demandam o uso de água quente, neste tipo de indústria, escolheu-se a pasteurização devido à sua ampla utilização e à relativamente baixa temperatura de processo, em torno de 75 °C.

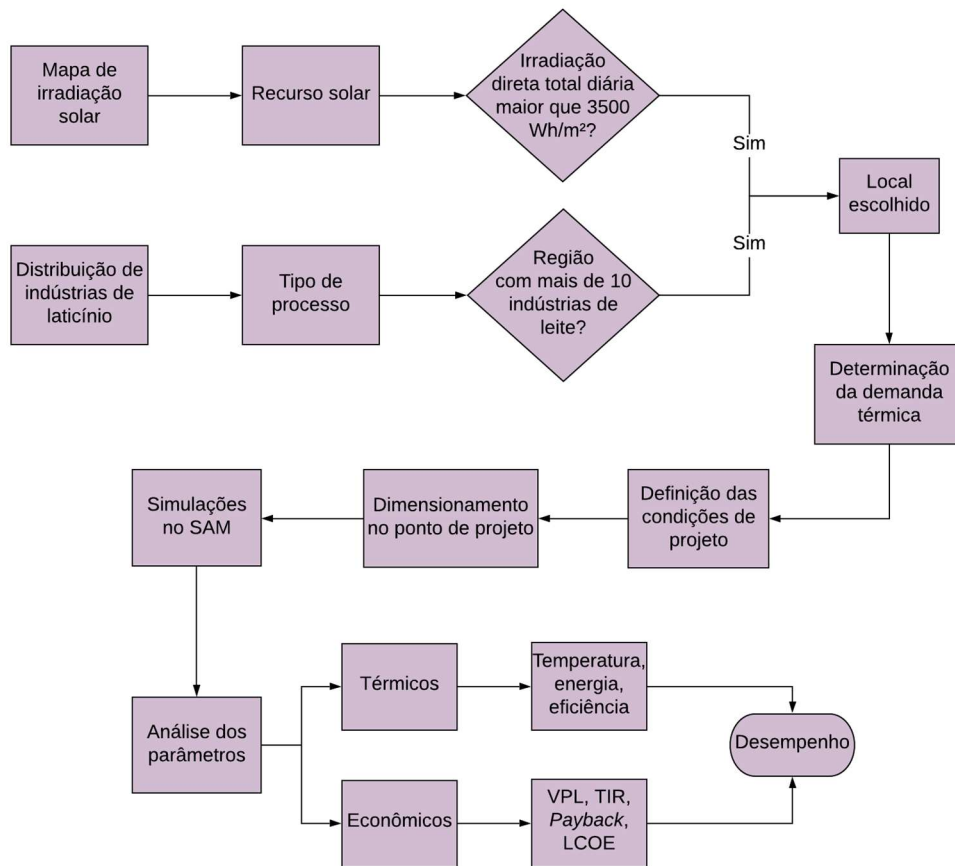


Figura 3.1 - Fluxograma das etapas seguidas na metodologia.

A seguir, determinou-se a demanda térmica do processo de pasteurização e as condições de projeto para as localidades em questão. Após, o dimensionamento e simulação dos sistemas no *software* SAM. Por fim, a partir da avaliação dos resultados, os parâmetros térmicos e econômicos foram calculados, para então se determinar o desempenho desses sistemas.

### 3.1 Escolha dos Locais

Como critério de seleção, em estudos relacionados à conversão de energia solar térmica, comumente adotam-se valores de irradiação consideravelmente altos. Neste trabalho foram selecionadas regiões com valores diários superiores a  $3.500 \text{ Wh/m}^2$ . Adicionalmente, visto que o presente trabalho utiliza como demanda o processo de pasteurização (indústrias de laticínios), buscou-se identificar regiões nas quais este setor possui expressiva participação (em termos de aglomerados de indústrias). Assim, com base nos dados apresentados no Atlas Brasileiro de Energia Solar [INPE, 2017] e no mapa apresentado em Cascaes, 2019, foram escolhidas 11 cidades.

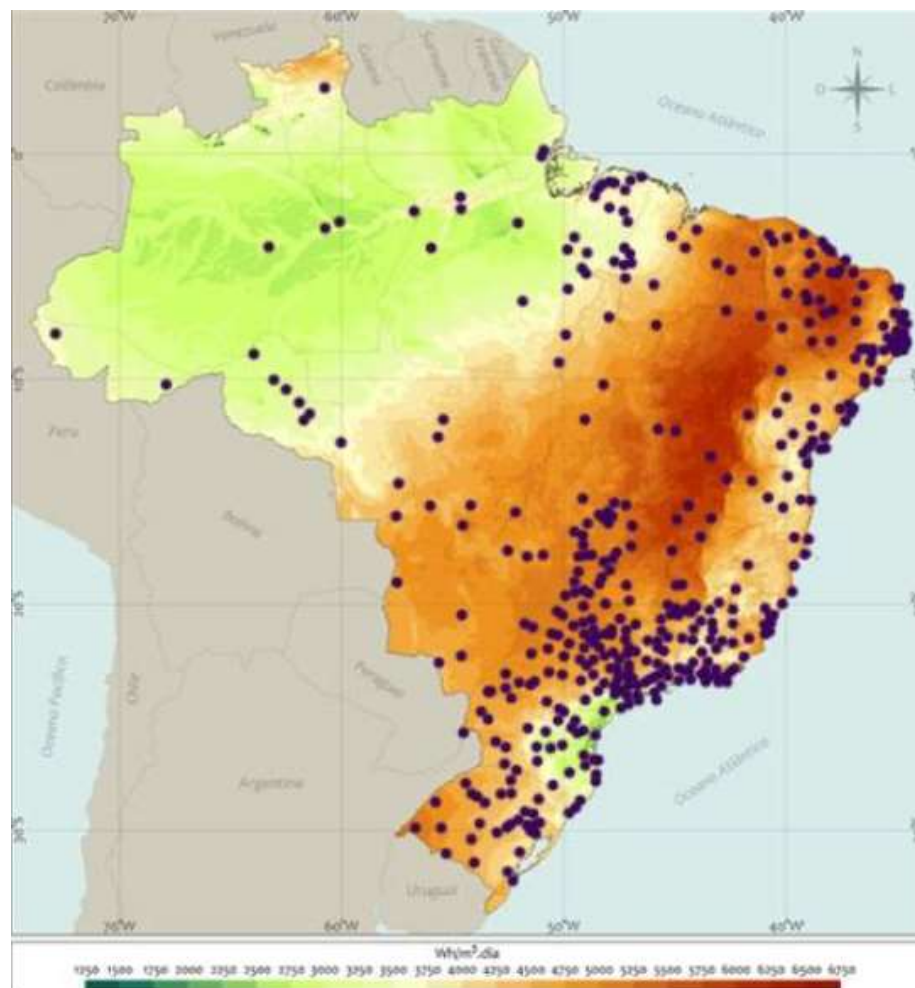


Figura 3.2 - Mapa com a distribuição da irradiação direta horizontal diária em média anual e as localidades com mais de 10 indústrias de laticínios [Adaptado de Cascaes, 2019].



### 3.2 Arquivos Climáticos

Os dados meteorológicos dos locais avaliados foram obtidos utilizando-se arquivos de extensão EPW (*Energy Plus weather file*), formato compatível com o software SAM, os quais foram medidos e tratados pelo INMET (Instituto Nacional de Meteorologia). Esses arquivos EPW são semelhantes aos chamados anos típicos meteorológicos (*Typical Meteorological Year*, TMY). Conforme [Duffie e Beckman, 2013], arquivos climáticos do tipo TMY apresentam informações horárias médias de valores de irradiância solar, temperatura ambiente (temperatura de bulbo seco), umidade relativa, direção e velocidade do vento, entre outros dados.

### 3.3 Software Utilizado

As análises aqui realizadas foram desenvolvidas a partir de simulações utilizando o *software* SAM, descrito anteriormente no Capítulo 2. Somado à sua variedade de modelos de sistemas de energia, ele é um programa de código fonte aberto e gratuito. Também apresenta facilidade na extração de dados e, portanto, certa praticidade na análise de seus resultados. Dessa forma, estes fatores foram decisivos na escolha do software adotado.

### 3.4 Coletor

O coletor escolhido para simulação foi o LF-11, da Industrial Solar [Industrial Solar, 2020], Figura 3.2, na qual estão em destaque a estrutura principal (1), os refletores primários (2), e o receptor (3), que é composto pelo tubo absorvedor e pelos refletores secundários. Suas dimensões são 4,06 m de comprimento por 7,5 m de largura, resultando em 30,45 m<sup>2</sup> de área para cada módulo, sendo que 22 m<sup>2</sup> são ocupados por 11 espelhos. A refletividade dos espelhos é de 0,95, e o tipo de receptor utilizado no LF-11 é o Schott PTR 70 [Schott, 2020].

De acordo com o catálogo, é possível utilizar fluidos de trabalho como água pressurizada e óleos térmicos. Também, pode ser utilizado para gerar diretamente e superaquecer vapor. Este modelo é capaz de gerar calor a uma potência entre 100 kW e 10 MW, e chega a atingir temperaturas próximas a 400 °C. Sua estrutura tem massa de 27 kg/m<sup>2</sup>. Operando sob ventos

de até 100 km/h, a expectativa de duração deste coletor é superior a 20 anos [Industrial Solar, 2020].

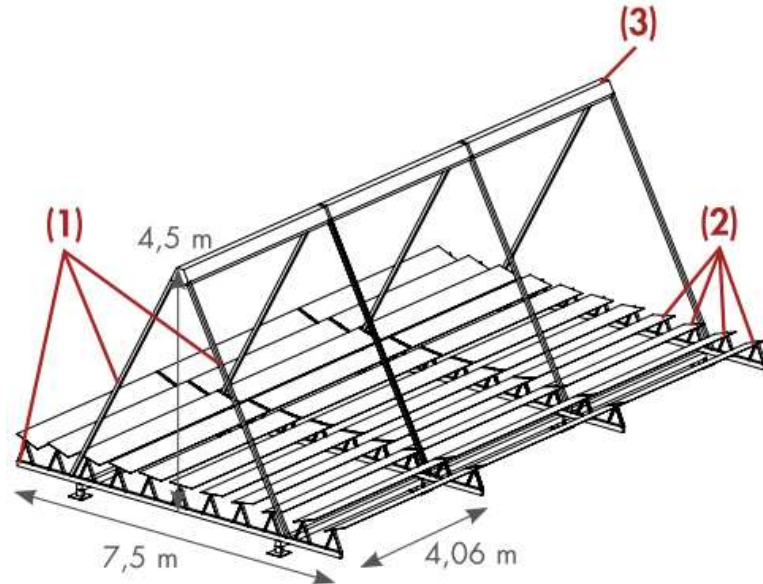


Figura 3.3 – Ilustração do módulo comercial LF-11 [Industrial Solar, 2020].

### 3.4.1 Correção do Ângulo de Incidência

O software SAM oferece três métodos de caracterização óptica para os coletores, que utilizam uma tabela ou uma equação polinomial. A primeira opção é uma tabela de posição solar, que fornece a eficiência óptica em função dos ângulos de azimute e de zênite. Com uma tabela semelhante, há a opção de caracterizar a eficiência com base nos ângulos de incidência transversal e longitudinal. O modo adotado no presente trabalho é o terceiro, no qual se caracteriza a performance óptica por meio das seguintes equações polinomiais, referentes aos ângulos transversal e longitudinal de incidência,

$$IAM_T = C_{0,T} + C_{1,T}\phi_T + C_{2,T}\phi_T^2 + C_{3,T}\phi_T^3 + C_{4,T}\phi_T^4 \quad (3.1)$$

$$IAM_L = C_{0,L} + C_{1,L}\phi_L + C_{2,L}\phi_L^2 + C_{3,L}\phi_L^3 + C_{4,L}\phi_L^4 \quad (3.2)$$

nas quais  $IAM_T$  e  $IAM_L$  são, respectivamente, os modificadores do ângulo de incidência transversal e longitudinal,  $\phi_T$  e  $\phi_L$  são os ângulos de incidência transversal e longitudinal, em graus, respectivamente, e  $C_0$ ,  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$  e  $C_4$  são as constantes de ajuste das equações polinomiais. Os resultados de cada equação são multiplicados entre si para se obter um valor final para o modificador da eficiência óptica [Wagner e Zhu, 2012].

O catálogo do coletor LF-11 [Industrial Solar, 2020] fornece os fatores de correção para ângulos de incidência de 0 a 90°, em forma de gráfico e de tabela (Anexo 1). Com estes dados é possível se obter uma linha de tendência, utilizando uma equação polinomial de quarta ordem, a fim de se determinar as constantes das equações anteriores e então aplicá-las no SAM.

### 3.4.2 Perdas Térmicas no Receptor

O coletor linear Fresnel LF-11 utiliza tubos absorvedores do tipo Scotch PTR 70 [Schott, 2020]. Seu catálogo (Anexo 2) apresenta as dimensões, as propriedades do absorvedor e do envelope e as perdas térmicas. As principais características informadas, que são necessárias no *software* SAM, estão resumidas a seguir, Tabela 3.1.

O tubo é feito de aço DIN 1.4541. Das opções disponíveis no programa, tem-se que o aço ASTM 321H é o mais similar ao aço DIN 1.4541 [Maryland Metrics, 2020]. O restante dos campos, como diâmetros e características ópticas, que não estão presentes no catálogo, são obtidos de uma biblioteca do SAM.

Tabela 3.1 - Propriedades do receptor [SAM, 2020; Schott, 2020].

Característica	Valor
Diâmetro externo do absorvedor	70 mm
Material	321H
Absortividade do absorvedor	0,96
Emissividade do absorvedor	$\leq 0,095$
Diâmetro externo do envelope	125 mm
Transmissividade do envelope	$\geq 0,97$

### 3.5 Estimativa da Demanda Térmica

O processo de pasteurização requer aquecimento do fluido, ou seja, energia térmica. Para tal, os coletores LFR irão concentrar energia proveniente do Sol e elevar a temperatura da água, que irá transferir calor e, assim, fornecer a energia necessária para realização do tratamento do leite.

Ao realizar o dimensionamento de um campo solar, para suprir a demanda de um processo, é necessário conhecer a quantidade de energia requerida. Considerando-se que a água quente é a única fonte de energia do processo, tem-se que o sistema de aquecimento deverá fornecer a mesma potência demandada pelo processo de pasteurização. Assim,

$$\dot{Q}_{fornecido} = \dot{Q}_{demandado} = \dot{Q} \quad (3.3)$$

na qual  $\dot{Q}_{fornecido}$  é a potência, em W, fornecida pelo sistema e  $\dot{Q}_{demandado}$  é a potência, em W, requerida para pasteurização. Aqui  $\dot{Q}$  está em W e é utilizado como uma simplificação na notação das variáveis.

Sendo conhecida a vazão volumétrica de leite, que passa pelo pasteurizador, a vazão mássica pode ser determinada através de

$$\dot{m}_{leite} = \rho_{leite} \dot{V}_{leite} \quad (3.4)$$

na qual  $\dot{m}_{leite}$  é a vazão mássica de leite, em kg/s, e  $\rho_{leite}$  é a massa específica, em kg/m<sup>3</sup>, do leite.

Conhecendo-se a vazão mássica do leite a ser aquecido, a potência demandada pelo processo de pasteurização é dada por

$$\dot{Q} = \dot{m}_{leite} c_{p,leite} (T_{pasteurização} - T_{e,leite}) \quad (3.5)$$

na qual,  $c_{p,leite}$  é o calor específico do leite, em J/kgK,  $T_{pasteurização}$  é a temperatura de pasteurização do leite, em °C, e  $T_{e,leite}$  é a temperatura de entrada do leite no trocador de calor, em °C.

Lima et al., 2017, realizaram um estudo exploratório da produção de leite no Brasil, onde sintetizaram diversos dados referentes a este setor, do qual é possível obter uma média da produção de leite. Quanto à massa específica e ao calor específico, Silva, 1997 e Lima et al., 2017 fornecem detalhes sobre a composição e as propriedades do leite. Os valores obtidos encontram-se a seguir, Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Dados adotados para o leite [Lima et al., 2017; Silva, 1997].

Característica	Valor
Vazão volumétrica média	113.600 L/dia
Massa específica	1,032 kg/L
Calor específico (T = 15 °C)	3,93 kJ/kgK

### 3.6 Condição de Projeto

O *software* SAM requer dados de entrada para realizar as simulações. Os principais parâmetros estão presentes na Tabela 3.3. A irradiância varia para cada local escolhido e foi determinada utilizando a recomendação de Burin, 2015: valores abaixo de 250 W/m<sup>2</sup> foram desconsiderados, e adotou-se o valor da série 95 percentil. A temperatura ambiente foi a média anual da temperatura de bulbo seco. A temperatura de entrada da água foi considerada 10 ° abaixo da temperatura ambiente, pois ela vem de tubulações mais isoladas dos arredores.

Visto que não está sendo trabalhado com altas temperaturas (menores de 100 °C), a água foi considerada como fase líquida e seu título nulo. A temperatura de saída da água está relacionada ao processo de pasteurização. Baptista e Pinto, 2018, informaram temperatura de pasteurização de 74°C. Entretanto, foi seguida a Instrução Normativa n° 51, de 18 de setembro de 2002 [Brasil, 2002], e esta temperatura foi considerada 75 °C. A temperatura de saída da água foi definida como 85 °C, visto que os trocadores de placa plana apresentam eficiências relativamente altas, entre 85% e 93% [Rahman, 2007; Thulukanan, 2013].

Estes dados, somados às características dos coletores e receptores, fornecem as eficiências ópticas e térmicas dos coletores linear Fresnel. Nas condições de projeto, as eficiências térmica e óptica foram de 92,45% e 71,40%, resultando em eficiência total do *loop* de 66%.

Tabela 3.3 - Parâmetros na condição de projeto

Parâmetro	Unidade
Irradiância de projeto	W/m <sup>2</sup>
Temperatura ambiente	°C
Temperatura de entrada	°C
Temperatura de saída	°C
Título de saída	-
Eficiência térmica	-
Eficiência óptica	-
Eficiência total	-

### 3.7 Perda de Carga no Receptor

O modelo utilizado no SAM requer a informação da perda de carga distribuída no receptor e localizada nos cabeçotes. Com base na abordagem exemplificada por [Wagner, 2014], o cálculo consiste nas seguintes etapas: determinar a vazão mássica por meio de balanços de energia e, na sequência, a velocidade do escoamento; calcular o número de Reynolds e o fator de atrito; e, por fim, determinar as perdas de carga.

Inicialmente foi calculada a potência absorvida pelo receptor na condição de projeto,

$$\dot{Q}_{loop} = A_{módulo} \eta_{loop} N_{módulos} I_{direta} \quad (3.6)$$

na qual  $\dot{Q}_{loop}$  é a potência absorvida pelo receptor, em W,  $A_{módulo}$  é a área do módulo linear Fresnel, em m<sup>2</sup>,  $\eta_{loop}$  é a eficiência geral do *loop*,  $N_{módulos}$  é o número de módulos no *loop* e  $I_{direta}$  é a irradiância direta normal, em W/m<sup>2</sup>. Realizando um balanço de energia no receptor, tem-se também que

$$\dot{Q}_{loop} = \dot{m}_{loop} c_{p_{\acute{a}gua}} (T_{projeto} - T_{e_{\acute{a}gua}}) \quad (3.7)$$

na qual  $\dot{m}_{loop}$  é a vazão mássica no receptor, em kg/s,  $c_{p_{\acute{a}gua}}$  é o calor específico da água, em J/kgK,  $T_{projeto}$  é a temperatura de saída da água, 85 °C, e  $T_{e_{\acute{a}gua}}$  é a temperatura de entrada da água, em °C.

Igualando-se as equações anteriores, pode-se determinar o valor da vazão mássica no *loop*. A partir dessa vazão e do diâmetro interno do receptor, encontra-se a velocidade do escoamento, dada por

$$v_{escoamento} = \left( \frac{\dot{m}_{loop}}{\rho_{\acute{a}gua}} \right) \left( \frac{4}{\pi D_i^2} \right) \quad (3.8)$$

na qual  $v_{escoamento}$  é a velocidade do escoamento, em m/s,  $\rho_{\acute{a}gua}$  é a massa específica da água, em kg/m<sup>3</sup>, e  $D_i$  é o diâmetro interno do receptor, em m.

A partir dos dados conhecidos até então, é possível calcular o número de Reynolds do escoamento,

$$Re = \left( \frac{\rho_{\acute{a}gua} v_{escoamento} D_i}{\nu_{\acute{a}gua}} \right) \quad (3.9)$$

na qual  $Re$  é o número de Reynolds e  $\nu_{\acute{a}gua}$  é a viscosidade dinâmica da água, em kg/(m s). Para escoamentos laminares,  $Re < 2400$ , a perda de carga distribuída é dada por

$$\Delta P_{laminar} = \frac{64}{Re} \quad (3.10)$$

na qual  $\Delta P_{laminar}$  é a perda de carga na tubulação em regime laminar, em m.c.a.. Caso o regime seja turbulento, o cálculo leva em consideração as dimensões e a rugosidade da tubulação, de maneira que

$$\Delta P_{turbulento} = f \left( \frac{L_{receptor}}{D_i} \right) \frac{v_{escoamento}^2}{2g} \quad (3.11)$$

na qual  $\Delta P_{turbulento}$  é a perda de carga no receptor, em m.c.a.,  $f$  é o fator de atrito,  $L_{receptor}$  é o comprimento do receptor, em m, e  $g$  é a aceleração da gravidade, em m/s<sup>2</sup>.

O fator de atrito pode ser obtido por meio do diagrama de Moody, conhecendo-se a rugosidade relativa da tubulação,

$$\varepsilon_{relativa} = \frac{\varepsilon}{D_i} \quad (3.12)$$

na qual  $\varepsilon_{relativa}$  é a rugosidade relativa,  $\varepsilon$  é a rugosidade absoluta, em mm, e  $D_i$  é o diâmetro interno do receptor, em mm. Finalmente, a perda de carga devido a equipamentos ou obstruções é chamada de perda localizada, definida como

$$\Delta P_{localizada} = K \left( \frac{v_{escoamento}^2}{2g} \right) \quad (3.13)$$

na qual  $K$  é o coeficiente de perda de carga, adimensional.

### 3.8 Dimensionamento

No modelo adotado no software SAM, a primeira aba chama-se *System Design*. Nela se declaram as características do campo solar e da aplicação desejada. Os principais dados fornecidos nesta etapa são os seguintes: a irradiância direta normal (*Direct Normal Irradiance*, DNI), a temperatura de entrada no sistema, o título do vapor d'água na saída dos coletores solares, a potência demandada e a pressão de entrada na aplicação. Neste trabalho seguiu-se a recomendação de Burin, 2015, a qual determina que a escolha do valor de DNI deve ser feita desconsiderando-se valores abaixo de um certo nível (por exemplo, 250 W/m<sup>2</sup>), e, então, calculando o percentil 95 da série restante.

A próxima etapa é a aba *Solar Field*, com dados referentes ao campo solar. Aqui se escolhe a quantidade de módulos de coletores LFR que serão utilizados em cada seção, de acordo com catálogo do LF-11 (Anexo 1) [Industrial Solar, 2020]. Para os dados referentes à lavagem dos espelhos, às perdas de carga e à inércia térmica foram adotados os valores padrão (*default*) sugeridos pelo software. Para cada cidade foi considerada como temperatura ambiente a média anual da temperatura de bulbo seco.



Ao final da configuração da parte técnica, há a aba *Collector and Receiver*, onde são informadas as características do coletor e do receptor. Quanto à geometria do coletor foram utilizados os dados do fabricante, ou seja 22 m<sup>2</sup> de área refletiva e 4,06 m de comprimento para cada módulo. A refletividade dos espelhos também foi informada pelo fabricante, 0,95, e para as perdas devido à sujeira nos espelhos considerado o valor padrão, i.e., 5%. Quanto aos desvios, devidos ao rastreamento solar e aos efeitos da geometria, também foram adotados os valores padrão, Tabela 3.4.

Tabela 3.4 - Efeitos ópticos adotados para o coletor solar.

Efeito	Valor [%]
Rastreamento	100
Efeitos de Geometria	84
Refletividade dos Espelhos	95
Sujeira nos Espelhos	95
Efeito Óptico Geral	100

Ainda nesta aba, seleciona-se o método de caracterização óptica do coletor. Conforme apresentado na Seção 3.3.1, foram utilizados os dados do fabricante para se determinar equações polinomiais de quarta ordem, as quais definem o comportamento dos módulos LFR. Quanto ao receptor, para descrever seu comportamento térmico e óptico, utilizou-se o modelo de tubo evacuado disponível no SAM.

A área de cada seção, ou *loop*, foi calculada com base nas dimensões do coletor e na quantidade de módulos em cada seção, ou seja,

$$A_{seção} = A_{módulo} N_{módulos} \quad (3.14)$$

na qual  $A_{seção}$  é a área de cada *loop*, em m<sup>2</sup>,  $A_{módulo}$  é a área refletiva de cada módulo, em m<sup>2</sup>, e  $N_{módulos}$  é o número de módulos em cada seção. Em seguida, o SAM calcula qual a área de abertura necessária para suprir a demanda térmica desejada. Com isso, estima qual a quantidade de *loops* necessários para atingir tal área e fornece o valor da área efetiva necessária para o projeto, bem como a energia térmica fornecida por este campo solar.

### 3.9 Propriedades e Parâmetros Avaliados

#### 3.9.1 Temperatura de saída da água

Como em qualquer análise semelhante a esta, existem diversas características que podem ser analisadas. Uma destas é a temperatura de saída do sistema, sendo de grande relevância para este caso da indústria de laticínios. Isto porque a pasteurização é um processo de grande dependência das temperaturas de trabalho. Assim, foram determinadas as temperaturas de saída da água do sistema LFR nas diferentes cidades.

#### 3.9.2 Energia Entregue ao Sistema

Outra avaliação importante do sistema estudado é o balanço energético. Com base nas temperaturas de saída e de entrada, e na quantidade de massa de água, foi possível determinar a quantidade de energia entregue

$$Q_{entregue} = m_{\text{água}} c_{p,\text{água}} (T_{\text{saída}} - T_{\text{entrada}}) \quad (3.15)$$

Na qual  $Q_{entregue}$  é a energia térmica entregue ao sistema, em J,  $m_{\text{água}}$  é massa de água total que fluiu através do sistema durante o período de uma hora, em kg,  $c_{p,\text{água}}$  é o calor específico da água, em J/(kg K),  $T_{\text{saída}}$  é a temperatura de saída do sistema, em °C, e  $T_{\text{entrada}}$  é a temperatura da água que entra no sistema de aquecimento solar, em °C.

#### 3.9.3 Demanda Mínima de Energia da Água

Visto que a água deve atingir a temperatura de saída de 85 °C, calculou-se a energia necessária para se chegar a essa temperatura através de

$$Q_{\text{demanda}_{\text{água}}} = m_{\text{água}} c_{p,\text{água}} (85 - T_{\text{saída}}) \quad (3.16)$$

na qual  $Q_{\text{demanda}_{\text{água}}}$  é a demanda mínima de energia da água, em J.

### 3.9.4 Combustível Economizado

O combustível economizado foi determinado utilizando-se a quantidade de energia entregue pelo sistema LFR à água. Utilizando o valor do poder calorífico inferior do combustível (lenha) determinou-se a massa de combustível economizado

$$m_{economizada} = \frac{Q_{entregue}}{PCI_{combustível}} \quad (3.17)$$

na qual  $m_{economizada}$  é a massa de combustível economizada, em kg,  $Q_{entregue}$  é a energia térmica entregue sistema de aquecimento solar, em kJ, e  $PCI_{combustível}$  é o poder calorífico inferior do combustível, em kJ/kg.

### 3.9.5 Eficiências dos Coletores

Existem diferentes abordagens para se determinar a eficiência de um sistema. Visto que o LFR apresenta tanto perdas ópticas quanto térmicas, foram avaliadas ambas eficiências. Para isso, foram utilizadas as eficiências apresentadas na validação realizada no estudo de Sharma et al., 2015. A eficiência óptica é dada por

$$\eta_{óptica} = \frac{Q_{absorvido}}{Q_{incidente}} \quad (3.18)$$

na qual  $\eta_{óptica}$  é a eficiência óptica,  $Q_{absorvido}$  é a energia absorvida pelo receptor, em J, e  $Q_{incidente}$  é a energia incidente nos coletores, em J. A eficiência térmica é dada por

$$\eta_{térmica} = \frac{Q_{entregue}}{Q_{absorvido}} \quad (3.19)$$

na qual  $\eta_{térmica}$  é a eficiência térmica e  $Q_{entregue}$  é a energia térmica entregue ao sistema, em J.

O produto dessas eficiências é a eficiência total dos coletores,  $\eta_{total}$ , que em termos da energia entregue e da energia incidente pode ser determinada através de

$$\eta_{total} = \frac{Q_{entregue}}{Q_{incidente}} \quad (3.20)$$

### 3.10 Viabilidade Econômica

#### 3.10.1 Valor Presente Líquido, TIR e Tempo de Retorno

Inicialmente, monta-se o fluxo de caixa do projeto, partindo de um investimento inicial no ano zero e contabilizando o fluxo de caixa nos anos subsequentes. O custo do investimento foi determinado com base em valores de custo por m<sup>2</sup> de campo solar. A receita foi considerada como sendo a quantidade monetária de combustível economizado, calculadas considerando sua massa e preço.

Com o fluxo de caixa montado, calcula-se o VPL do projeto para cada cidade, utilizando uma taxa média de atratividade (TMA). A escolha da TMA pode se basear na comparação com outros investimentos. Uma das opções é o fundo de venture capital, ou *private equity*. Neste tipo de fundo se compra participações em empresas de capital fechado, visando melhorar suas estratégias e aumentar a lucratividade, para posteriormente serem vendidas ou, então, abrir seu capital na bolsa de valores [Exame, 2014]. Por fim, encontra-se a taxa interna de retorno (TIR) do fluxo de caixa montado. Caso a TIR seja menor que a TMA, o projeto não é viável, do ponto de vista econômico.

Após ter montado o fluxo de caixa e calculado o VPL, para cada cidade, encontra-se o tempo de retorno do projeto. Este dado é obtido simplesmente observando a evolução do VPL e identificando em que momento seus valores passam a ser positivos.

#### 3.10.2 Custo Nivelado de Energia

Uma das variáveis presentes neste cálculo é o FCR, relação necessária entre a receita e investimento para cobrir o investimento inicial, que depende de vários fatores. Assim, o SAM é alimentado com informações como período de análise, inflação, impostos e juros de empréstimos para determinar esta taxa. Conhecendo os custos envolvidos e a energia gerada

anualmente, para cada cidade, utiliza-se então a Equação 2.2 para determinar o custo nivelado de energia, LCOE.

### **3.10.3 Análise de Sensibilidade**

A fim de identificar quais parâmetros possuem maior influência nos parâmetros financeiros, realiza-se uma análise de sensibilidade. Para tal, toma-se os valores utilizados e calculados como referência. Modifica-se então os valores de entrada individualmente, em 10%, para mais e para menos, determinando o impacto causado por cada variação. Para melhor identificar a sensibilidade dos parâmetros, foi construído um gráfico para o VPL e outro para o LCOE, demonstrando as relações entre estes e suas variáveis.

## 4 DISCUSSÃO E RESULTADOS

### 4.1 Localidades Selecionadas

Para a escolha das cidades foram adotados os seguintes critérios: regiões com irradiação direta horizontal diária em média anual superior a  $3.500 \text{ Wh/m}^2$ , e com expressiva quantidade de indústrias do ramo de laticínios. Com dados do Atlas Brasileiro de Energia Solar [INPE, 2017] e com o mapa abaixo [Cascaes, 2019], selecionou-se três regiões que satisfaziam ambos os critérios, as quais estão destacadas na Figura 4.1.

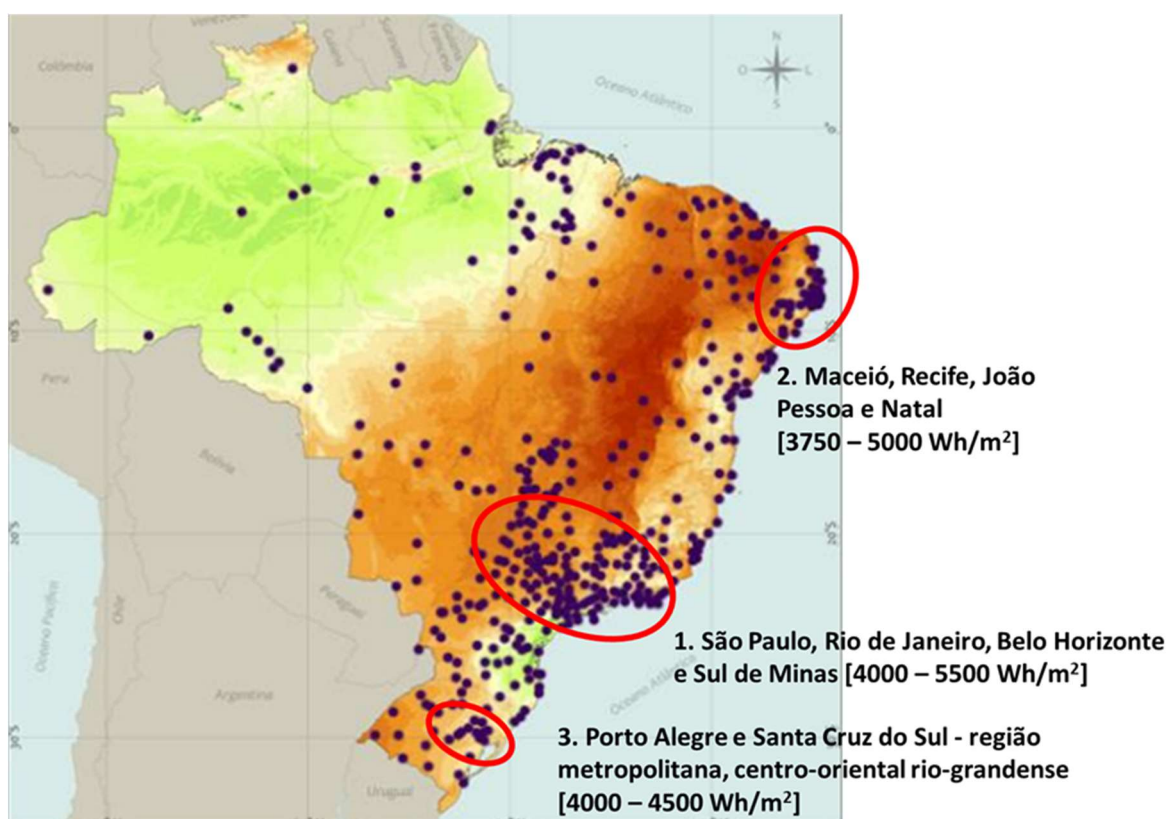


Figura 4.1 - Mapa da distribuição da irradiação direta horizontal diária em média anual e das localidades com mais de 10 indústrias de laticínios [Adaptado de Cascaes, 2019].

Para a utilização de arquivos climáticos que representem as características de cada região, foram selecionadas algumas cidades, e seus respectivos arquivos. A região 1 apresenta maior densidade de indústrias, e assim foram escolhidas, além das três capitais, as cidades de

Uberlândia e Ribeirão Preto. Na região 3 escolheu-se a capital e a cidade de Rio Pardo. Na região 2 foram selecionadas as quatro capitais. Assim, monta-se um cenário constituído de onze de cidades, Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Cidades selecionadas e suas temperaturas ambiente em média anual.

Região 1		Região 2		Região 3	
Cidade	Temperatura Ambiente (°C)	Cidade	Temperatura Ambiente (°C)	Cidade	Temperatura Ambiente (°C)
São Paulo	19,57	Maceió	25,52	Porto Alegre	20,03
Rio de Janeiro	23,15	Recife	25,75	Rio Pardo	18,79
Belo Horizonte	21,75	João Pessoa	26,02		
Uberlândia	22,95	Natal	26,90		
Ribeirão Preto	23,63				

Uma informação importante na avaliação do sistema de aquecimento solar nas diferentes cidades é o *direct normal irradiance*, DNI, de projeto. Valores altos indicam alta incidência solar, e conseqüentemente menor área de módulos LFR. Por outro lado, DNI de projeto baixo implica baixo recurso solar e, por conseqüência, uma grande área de coletores.

Para escolha do valor de DNI destes locais, foi seguida a recomendação de Burin, 2015, ou seja, valores de DNI menores que 250 W/m<sup>2</sup> foram desconsiderados, e, então, a série percentil 95 dos dados restantes foi calculada. A partir dos dados climáticos do SAM e realizando este tratamento estatístico, chega-se nos resultados apresentados na Tabela 4.2.

Como exemplo, a irradiância direta normal ao longo do ano em Porto Alegre é ilustrada na Figura 4.2. Nos meses de verão há alta incidência de raios solares, enquanto que nos meses de inverno há baixa incidência. Para as outras cidades, essa diferença entre os meses de verão e inverno se mantém. Contudo, ela diminui conforme a diminuição da latitude do local. Ou seja, o comportamento da irradiância solar, ao longo do ano, tende a ser praticamente constante para as cidades mais próximas da linha do Equador.

Tabela 4.2 - DNI para as cidades escolhidas.

Cidade	DNI de projeto [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]
Recife	836
Belo Horizonte	768
Rio de Janeiro	800
Porto Alegre	756
São Paulo	734
Uberlândia	784
João Pessoa	766
Natal	746
Rio Pardo	769
Ribeirão Preto	840
Maceió	823

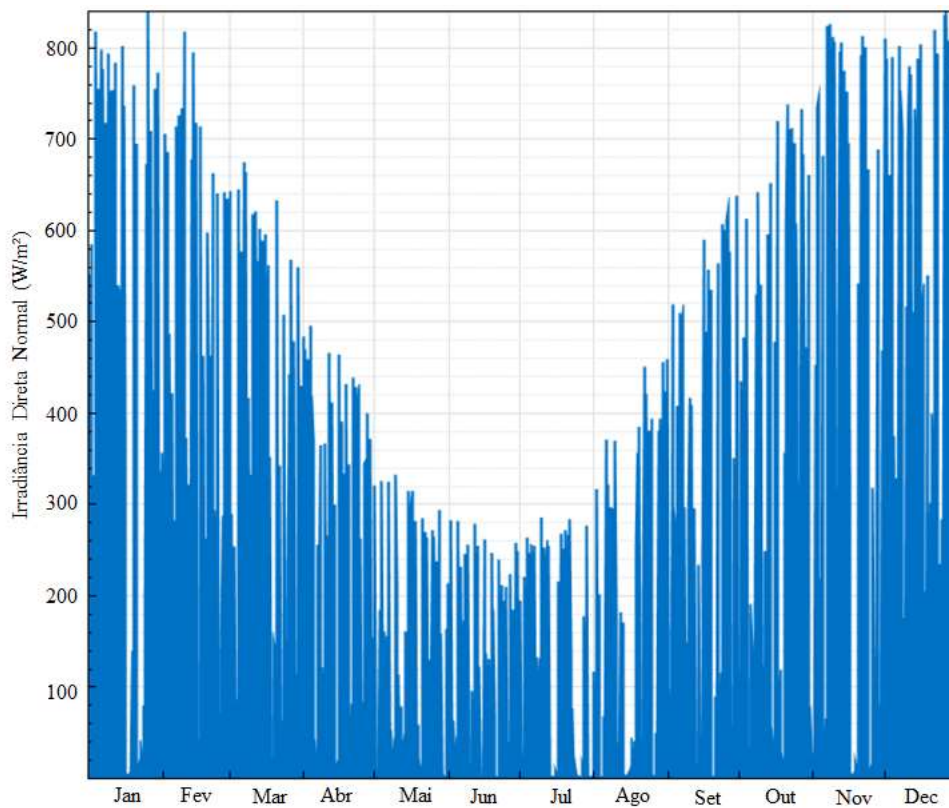


Figura 4.2 - Irradiância direta normal para Porto Alegre [SAM, 2020].



## 4.2 Demanda Térmica

Conforme apresentado no estudo realizado por Lima et al., 2017, a capacidade média de processamento de leite no Brasil é de 113.600 L/dia. Quanto à massa específica do leite, tem-se uma variação entre 1,029 e 1,039 kg/m<sup>3</sup> [Grosch, 2008]. Neste trabalho, foi, então, considerado o valor médio de 1,032 kg/m<sup>3</sup> [Silva, 1997]. Considerando-se que a produção é contínua, operando durante as 24 horas do dia, a vazão mássica de leite, de acordo com a Equação 3.4, é 1,36 kg/s.

O leite a ser pasteurizado entra no sistema à temperatura de conservação é determinada na IN n° 51 de 18 de setembro de 2002 [Brasil, 2002], 4 °C, e é aquecido até a temperatura de pasteurização, 75 °C. Conhecendo-se o calor específico do leite, através da Equação 3.5, chega-se à demanda térmica do processo, 1006 MWh, para um período de funcionamento diário das 8h às 16h, totalizando 2920 horas anuais. Essa é a energia necessária para aquecer o leite até sua temperatura de pasteurização. Visto que há perdas nas tubulações, que transportam a água do campo solar até a aplicação, o sistema foi dimensionado para fornecer 30% a mais de energia. Dessa forma, a demanda térmica do processo será de 1437 MWh.

## 4.3 Performance Óptica do Coletor

### 4.3.1 Modificadores do Ângulo de Incidência

Para a caracterização óptica dos coletores LFR no software SAM são utilizadas as funções polinomiais, Equações 3.1 e 3.2. A determinação de seus coeficientes é realizada a partir dos dados fornecidos pelo fabricante, Tabela 4.3, na qual estão representados os modificadores para os ângulos de incidência transversal e longitudinal, para valores de 0 a 90°.

A partir dos valores da Tabela 4.3, foi gerado um gráfico, Figura 4.3 para as duas orientações, e uma linha de tendência polinomial de quarta ordem foi aplicada à cada gráfico. Assim, obteve-se os coeficientes para correção dos ângulos de incidência, Tabela 4.4, em graus, e os correspondentes erros quadráticos médios, referentes às Equações 3.1 e 3.2.

Percebe-se pelos valores dos erros quadráticos que o ajuste de curva, por meio de uma regressão polinomial, resultou em uma equação que fornece resultados próximos aos valores tabelados. Em especial, o ajuste relacionado ao ângulo longitudinal de incidência, que chegou ao valor unitário para  $R_L^2$ .

Tabela 4.3 - Fatores de Correção dos Ângulos de Incidência [Industrial Solar, 2020].

Ângulo	Transversal	Longitudinal
0	1,000	1,000
5	1,044	0,962
10	1,000	0,937
15	1,034	0,907
20	0,996	0,867
25	1,015	0,821
30	0,998	0,768
40	0,956	0,640
50	0,951	0,485
60	0,784	0,311
70	0,553	0,141
80	0,300	0,022
90	0,075	0,000

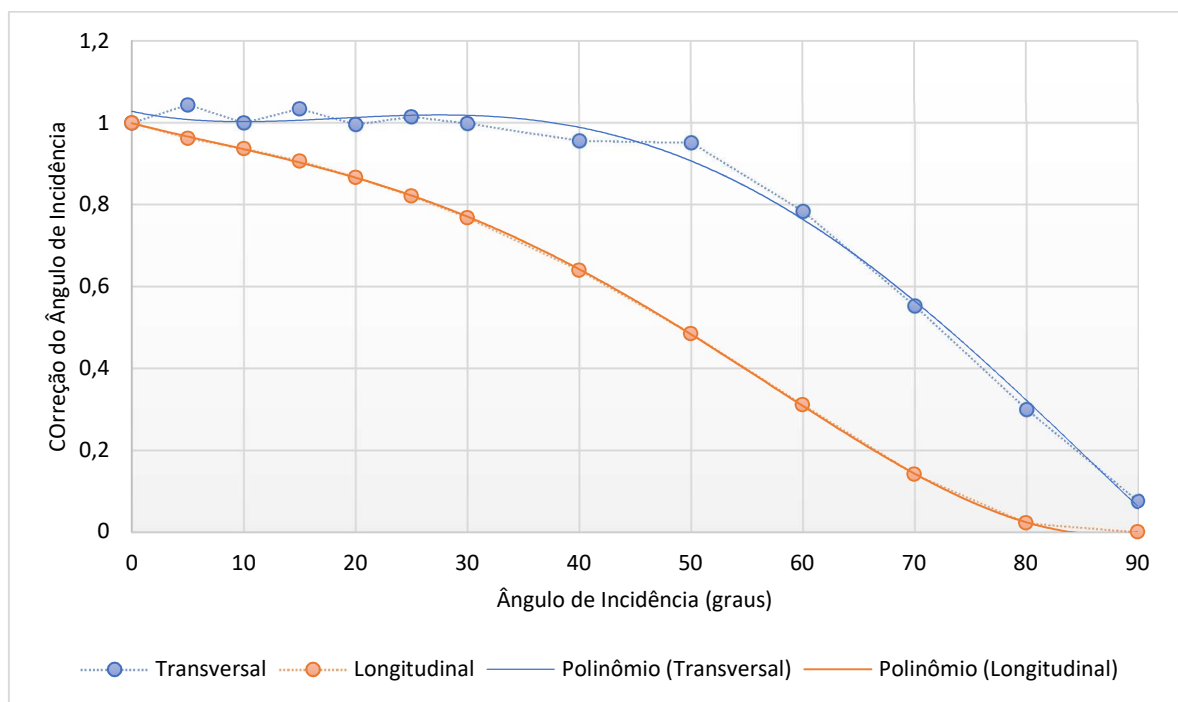


Figura 4.3 - Linha de tendência polinomial de quarta ordem para obtenção dos coeficientes para correção dos ângulos de incidência

Tabela 4.4 - Coeficientes da correção do ângulo de incidência, em graus, e erros quadráticos.

Ângulo Transversal		Ângulo Longitudinal	
$C_{0,T}$	1,028	$C_{0,L}$	0,9989
$C_{1,T}$	-0,0059	$C_{1,L}$	-0,007
$C_{2,T}$	0,0004	$C_{2,L}$	0,0001
$C_{3,T}$	$-9 \times 10^{-6}$	$C_{3,L}$	$-6 \times 10^{-6}$
$C_{4,T}$	$5 \times 10^{-8}$	$C_{4,L}$	$5 \times 10^{-8}$
$R_T^2$	0,99	$R_L^2$	1

#### 4.3.2 Efeitos de Geometria, Rastreamento e Espelhos

Na seção de caracterização óptica do coletor foi utilizado o valor de refletividade dos espelhos fornecido pelo fabricante, 0,95. A eficiência devido ao rastreamento foi considerada como valor unitário, pois o sistema LFR é capaz de direcionar corretamente seus espelhos, devido à sua geometria de espelhos planos e alinhados. Já para os efeitos da geometria, foi considerado o valor de 84%, valor padrão do SAM, pois sua configuração não permite que todos os raios solares sejam diretamente direcionados para o coletor. A eficiência, devido à sujeira nos espelhos, ficou em 95% - para representar as perdas na refletividade causadas pela poeira depositada nos espelhos. O erro denominado pelo SAM de erro geral, referente aos efeitos não representados nos outros parâmetros, foi assumido como 0%, pois não foram contabilizadas perdas diferentes daquelas já citadas.

#### 4.4 Caracterização do Receptor

Utilizando-se o modelo de tubo evacuado para caracterização do comportamento do receptor, adotou-se os valores para geometria do receptor conforme ilustrado na Figura 4.4. Os diâmetros externos do envelope e do absorvedor foram informados pelo fabricante, enquanto que os diâmetros internos foram obtidos de uma biblioteca do *software*. O material do absorvedor foi escolhido como sendo aço ASTM 31H, por ser a opção disponível que mais se assemelha ao aço DIN 1.4541 [Maryland Metrics, 2020].

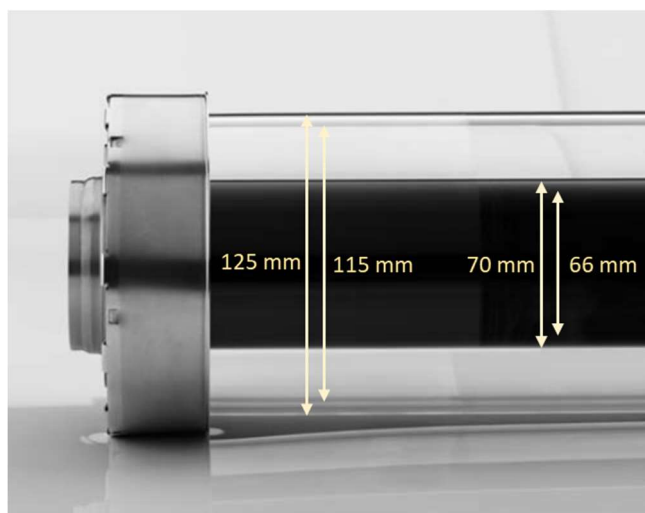


Figura 4.4 - Dimensões do receptor [SAM, 2020 e SCHOTT, 2020].

A rugosidade relativa do receptor é obtida pela divisão da rugosidade do tubo por seu diâmetro interno. Para a rugosidade absoluta do material, tem-se que  $3 \mu\text{m}$  é um valor conservativo para canos de aço extrudados desse tipo [SAM, 2020]. Assim, a rugosidade relativa referente ao diâmetro interno é de  $45 \times 10^{-6}$ . As demais informações referentes às características ópticas do coletor são apresentadas na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 - Variações e características dos receptores [SAM, 2020; Schott, 2020]

	Varição 1	Varição 2	Varição 3
Fração	0,9	0,05	0,05
Absortividade do absorvedor	0,96	0,96	0,8
Emitância do absorvedor	0,097	0,097	0,65
Absortividade do envelope	0,02	0,02	0,00
Emissividade do envelope	0,86	0,86	1
Transmissividade do envelope	0,97	0,97	1
Envelope quebrado	Não	Não	Sim
Pressão no receptor (Pa)	133	101.325	101.325
Estimativa de perda de calor (W/m)	150	1100	1500
Perda por sombreamento nas extremidades (%)	4,00	4,00	4,00
Perda por sujeira (%)	2,00	2,00	0,00

A fim de contabilizar danos nos receptores ao longo do tempo, são consideradas três variações diferentes. A primeira é simplesmente o tubo receptor com características de fábrica. A segunda contabiliza os casos em que há perda do vácuo no tubo e a terceira é para os casos onde há quebra no envelope. São utilizadas frações para demonstrar o quão presente são essas variações no campo solar. Para o primeiro caso, assume-se que em 90% do tempo os receptores vão apresentar suas características de fábrica. Para os outros, espera-se que ao longo da vida útil do projeto cada variação ocorrerá em 5% do tempo. A perda térmica no ponto de projeto, calculada pela ponderação entre a fração de ocorrência e a perda estimada de cada variação, é de 265 W/m.

#### 4.5 Perda de Carga no Receptor

O passo inicial foi determinar a potência absorvida pela água no receptor, a fim de determinar a vazão mássica do fluido, sendo a área de *loop* de 22 m<sup>2</sup> [Industrial Solar, 2020], a eficiência do *loop* nas condições de projeto de 0,66, a recomendação do fabricante de 16 módulos por *loop* [Industrial Solar, 2020], e a irradiação de projeto variando para cada cidade – Equação 3.6. Considerando o calor específico da água de 4.184 J/(kg K), a temperatura de saída igual a 85 °C e a temperatura de entrada sendo 10 °C abaixo da temperatura ambiente – e igualando as Equações 3.6 e 3.7 – foi possível determinar a vazão mássica de projeto.

A partir da vazão mássica obteve-se a velocidade do fluido no diâmetro interno de 66 mm do receptor. Em seguida, foi possível determinar o número de Reynolds deste escoamento considerando a viscosidade dinâmica de  $529 \times 10^{-6}$  kg/(m s). Tendo a rugosidade absoluta do tubo de 3 μm e conseqüente rugosidade relativa de  $45 \times 10^{-6}$ , foi possível encontrar o fator de atrito para cada cidade. Conforme informado por [Wagner e Gilman, 2011], o coeficiente de perda de carga localizada para os cabeçotes é 0,6. Com isso, obteve-se as perdas de carga distribuída e localizada nos receptores. As quantidades aqui descritas estão apresentadas nas Tabelas 4.6 e 4.7.

Tabela 4.6 - Valores referentes às perdas de carga.

Cidades	$\dot{Q}_{loop}$ (kW)	$\dot{m}_{loop}$ (kg/s)	$V$ (m <sup>3</sup> /s)	$v_{escoamento}$ (m/s)	$Re$	$f$
Maceió	191,20	0,77	0,00077	0,23	28018	0,024
Belo Horizonte	178,42	0,67	0,00068	0,20	24587	0,025
Uberlândia	182,02	0,70	0,00070	0,21	25568	0,025
João Pessoa	177,96	0,72	0,00072	0,21	26298	0,025
Recife	194,22	0,78	0,00079	0,23	28571	0,024
Rio de Janeiro	185,86	0,72	0,00072	0,21	26191	0,025
Natal	173,31	0,71	0,00072	0,21	26000	0,025
Porto Alegre	175,68	0,65	0,00065	0,19	23568	0,026
Rio Pardo	178,65	0,64	0,00065	0,19	23518	0,026
Ribeirão Preto	195,15	0,76	0,00076	0,22	27716	0,024
São Paulo	170,52	0,62	0,00062	0,18	22716	0,026

Tabela 4.7 - Perdas de carga do coletor.

Cidades	Receptor		Cabeçotes	
	h (m)	$\Delta P$ (Bar)	h (m)	$\Delta P$ (Bar)
Maceió	0,061	0,006	0,00155	0,00015
Belo Horizonte	0,049	0,005	0,00120	0,00012
Uberlândia	0,053	0,005	0,00129	0,00013
João Pessoa	0,056	0,005	0,00137	0,00013
Recife	0,063	0,006	0,00162	0,00016
Rio de Janeiro	0,056	0,005	0,00136	0,00013
Natal	0,055	0,005	0,00134	0,00013
Porto Alegre	0,047	0,005	0,00110	0,00011
Rio Pardo	0,047	0,005	0,00109	0,00011
Ribeirão Preto	0,060	0,006	0,00152	0,00015
São Paulo	0,043	0,004	0,00102	0,00010

## 4.6 Dimensionamento

O dimensionamento foi realizado utilizando um sistema similar para todas as cidades, a variar o valor de DNI de cada uma, e as temperaturas ambiente e de entrada da água. A escolha do DNI na condição de projeto foi feita seguindo a recomendação de [Burin, 2015]. A pressão de saída do sistema na condição de projeto foi considerada de acordo valor padrão de 1 bar, próximo à pressão atmosférica de 101.325 Pa. Visto que a temperatura de saída é dependente da temperatura de pasteurização e os trocadores de placa plana apresentam eficiências relativamente altas, adotou-se 85 °C para temperatura de projeto na saída dos coletores, 10 °C acima da temperatura de pasteurização. Quanto ao título do fluido de trabalho foi adotado o valor de 0%, pois considerou-se apenas a presença de água em fase líquida.

Conforme o valor do DNI de projeto varia, a área necessária para suprir a demanda térmica também varia, Figura 4.5. Os valores variaram entre 878,68 m<sup>2</sup>, para Ribeirão Preto, e 1.015,93 m<sup>2</sup>, para São Paulo.

Cada módulo do coletor LFR tem 22 m<sup>2</sup> e, segundo recomendação do fabricante, utilizam-se 16 módulos por *loop*. Assim, através da Equação 3.6, tem-se que a área de cada seção é 352 m<sup>2</sup>. Duas seções possuem 704 m<sup>2</sup> e 3 seções possuem 1.056 m<sup>2</sup>. Percebe-se, também, Figura 4.4, que a área refletiva necessária em cada cidade foi maior que dois *loops*. Dessa forma, obteve-se a configuração de três seções de coletores LFR LF-11.

Em resumo, foi encontrado que o sistema de aquecimento solar de água, LFR, deve conter 3 *loops* de coletores, com área refletiva total de 1.056 m<sup>2</sup>. Visto que o sistema necessita de outros elementos como estrutura, suportes e tubulação, considerou-se um adicional de 20% sobre a área ocupada pelos espelhos. Dessa forma, chegou-se à área total de terreno necessária, 1.267,20 m<sup>2</sup>.

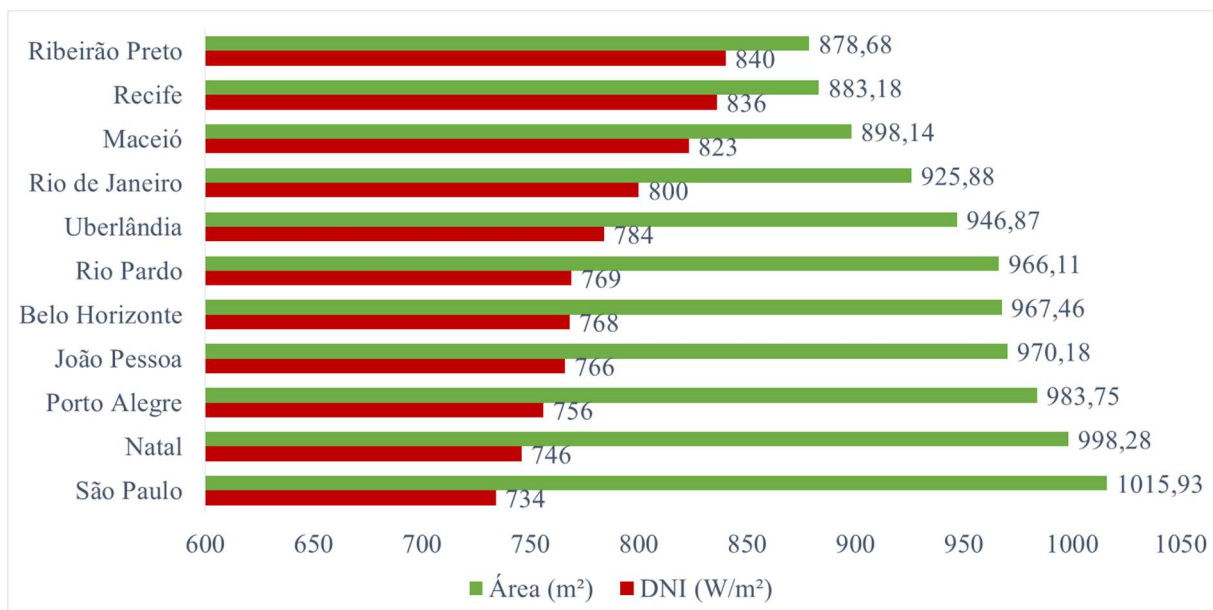


Figura 4.5 - Relação de DNI e área necessária para as cidades avaliadas.

#### 4.7 Horário de Funcionamento do Sistema

Por se tratar de um sistema dependente exclusivamente do recurso solar, em uma parcela significativa dos dias, o mesmo estará ocioso. Este comportamento é mais expressivo em locais de maior latitude, como as cidades da região Sul. A Figura 4.6 apresenta um mapa anual de temperaturas para Porto Alegre, com os dias no eixo horizontal, com as horas no eixo vertical e com as temperaturas atingidas, em °C, na escala de cores.

Percebe-se que nos meses de verão, a água começa a ser aquecida por volta das 7 horas da manhã e alcança temperaturas mais elevadas aproximadamente às 8 horas, sendo assim mantidas até as 17 horas. Nos meses de inverno, como há menos horas de Sol, tem-se um intervalo menor de tempo com temperaturas altas, praticamente das 10 às 15 horas. Para fins de análise e comparação, utilizando essa característica e conceito de janela solar, assumiu-se que o sistema de aquecimento LFR funcionará das 8 às 16 horas, para todas as cidades.



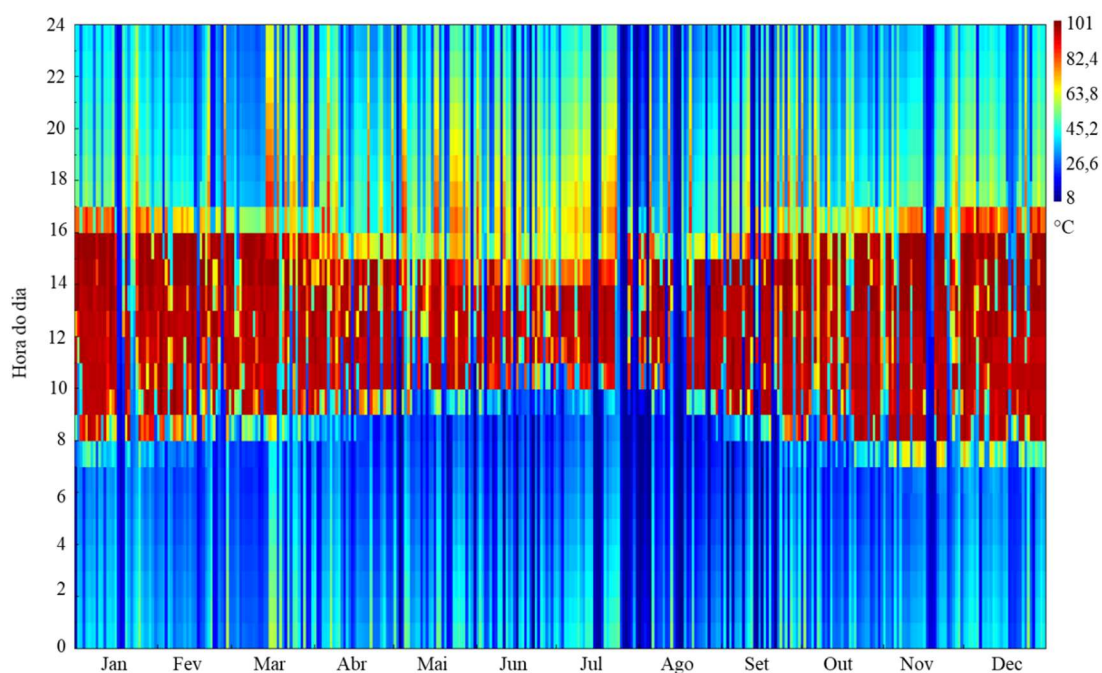


Figura 4.6 - Mapa de temperaturas para Porto Alegre.

#### 4.8 Vazão Mássica

As vazões mássicas médias mensais, bem como anuais, são apresentadas na Tabela 4.8. Cidades com menor irradiação solar, apresentaram menores vazões – 0,47 kg/s e 0,51 kg/s para São Paulo e Porto Alegre, respectivamente. Em Ribeirão Preto ocorreram as maiores vazões, 1,06 kg/s, seguida de Recife, 0,86 kg/s. No intuito de promover a saída da água à temperatura de operação, cidades com maior recurso solar tiveram maiores vazões mássicas.

Tabela 4.8 - Vazões mássicas da água, em kg/s.

	Recife	Belo Horizonte	Rio de Janeiro	Porto Alegre	São Paulo	Uberlândia	João Pessoa	Natal	Rio Pardo	Ribeirão Preto	Maceió
Janeiro	0.93	0.68	0.64	0.68	0.46	0.64	0.70	0.72	0.77	0.90	0.89
Fevereiro	0.97	0.64	0.67	0.58	0.52	0.77	0.87	0.80	0.66	0.88	0.79
Março	0.94	0.83	0.68	0.54	0.53	0.91	0.79	0.69	0.56	0.83	0.89
Abril	0.77	0.54	0.53	0.42	0.42	0.75	0.68	0.69	0.47	1.05	0.69
Mai	0.70	0.54	0.48	0.34	0.41	0.62	0.61	0.65	0.36	1.09	0.48
Junho	0.60	0.49	0.43	0.32	0.36	0.56	0.56	0.59	0.33	1.09	0.48
Julho	0.69	0.50	0.48	0.33	0.43	0.56	0.54	0.60	0.33	1.10	0.53
Agosto	0.76	0.64	0.54	0.38	0.44	0.71	0.67	0.66	0.40	1.29	0.56
Setembro	0.93	0.73	0.54	0.51	0.49	0.91	0.79	0.79	0.51	1.30	0.74
Outubro	1.06	0.64	0.64	0.59	0.52	0.77	0.76	0.86	0.57	1.24	0.91
Novembro	1.00	0.73	0.53	0.68	0.53	0.70	0.75	0.70	0.77	0.97	0.92
Dezembro	0.93	0.53	0.60	0.77	0.59	0.68	0.76	0.65	0.80	0.95	0.85
<b>Total</b>	<b>0.86</b>	<b>0.62</b>	<b>0.56</b>	<b>0.51</b>	<b>0.47</b>	<b>0.71</b>	<b>0.71</b>	<b>0.70</b>	<b>0.54</b>	<b>1.06</b>	<b>0.73</b>

#### 4.9 Energia Entregue ao Fluido de Trabalho

A partir da Equação 3.15 foi possível determinar a energia entregue à água do sistema, a cada intervalo de uma hora de operação, em Wh. A Tabela 4.9 apresenta a energia entregue a cada mês, e a soma anual, para as diferentes cidades, em MWh. Nota-se que o maior resultado foi para a cidade de Ribeirão Preto (980 MWh/ano), seguida de Recife (785 MWh/ano). Os menores valores ocorreram na cidade São Paulo (335 MWh/ano), logo abaixo de Porto Alegre (366 MWh/ano).

Tabela 4.9 - Energia entregue ao sistema, em MWh.

	Recife	Belo Horizonte	Rio de Janeiro	Porto Alegre	São Paulo	Uberlândia	João Pessoa	Natal	Rio Paro	Ribeirão Preto	Maceió
Janeiro	76	49	42	48	24	44	52	54	60	66	71
Fevereiro	70	41	42	36	31	54	63	54	44	60	53
Março	74	67	49	36	34	74	59	49	39	60	71
Abril	56	36	30	23	22	59	48	48	28	80	49
Maiο	51	40	29	12	22	47	42	45	18	87	26
Junho	38	34	21	10	16	40	36	41	9	84	25
Julho	51	33	30	10	29	40	35	45	9	88	34
Agosto	57	49	34	16	24	59	50	50	21	107	35
Setembro	72	55	31	31	28	74	61	60	33	104	54
Outubro	87	46	42	40	33	60	59	67	36	101	73
Novembro	79	54	29	46	34	50	57	53	59	71	72
Dezembro	74	31	36	60	39	49	60	49	63	72	68
<b>Total</b>	<b>785</b>	<b>535</b>	<b>415</b>	<b>366</b>	<b>335</b>	<b>648</b>	<b>622</b>	<b>615</b>	<b>419</b>	<b>980</b>	<b>632</b>

Ainda com relação à Tabela 4.9, as cidades da região Sul apresentaram variação significativa entre meses de verão e inverno. Já as cidades da região Nordeste, como João Pessoa e Natal, mostraram resultados mais regulares ao longo dos meses. Isto está coerente com o fato de cidades próximas ao Equador apresentam menor variação na irradiação solar anual. Para as demais cidades, o regime de chuvas pode ter influenciado as diferenças mensais.

#### 4.10 Demanda Mínima de Energia da Água

Um requerimento importante é que a água que passa pelo sistema de aquecimento solar tenha sua temperatura elevada a 85 °C. Utilizando a Equação 3.16, foi possível determinar a energia necessária para aquecer o fluido de trabalho até esta temperatura de projeto, em Wh. A princípio espera-se que cidades com maior disponibilidade solar e maiores temperaturas ambiente apresentassem menor demanda de aquecimento da água, visto que a diferença de

temperatura na Equação 3.16 é menor. Contudo, na Tabela 4.8 observou-se vazões mássicas de valores mais elevados nestas mesmas cidades.

Por exemplo para a cidade de Ribeirão Preto a Tabela 4.9 mostra que foi nesta cidade o sistema que mais recebeu energia (980 MWh). Isto está de acordo com sua maior irradiância de projeto (Tabela 4.2 - 840 W/m<sup>2</sup>). Nesta localidade há uma menor diferença de temperatura para a água atingir os 85 °C de projeto, devido ao seu recurso solar. Espera-se que a demanda de energia da água seja conseqüentemente menor. Entretanto, nela há um valor de vazão mássica superior às outras localidades (Tabela 4.8 - 1,06 kg/s). Assim, a água apresenta maior demanda energética (880 MWh). Esta relação entre energia entregue ao sistema e demanda mínima da água é observada nas outras localidades.

Tabela 4.10 - Demanda mínima de energia da água, MWh.

	Recife	Belo Horizonte	Rio de Janeiro	Porto Alegre	São Paulo	Uberlândia	João Pessoa	Natal	Rio Pardo	Ribeirão Preto	Maceió
Janeiro	66	47	42	46	29	42	47	48	54	61	62
Fevereiro	62	39	41	35	31	49	55	49	41	54	49
Março	64	59	47	35	35	65	53	45	38	56	62
Abril	51	34	33	26	27	52	44	44	31	71	45
Maiο	47	37	30	19	27	43	40	42	23	78	29
Junho	37	32	26	18	23	37	35	37	19	76	26
Julho	46	33	30	20	30	38	34	40	21	78	32
Agosto	52	44	36	25	29	52	45	44	27	94	35
Setembro	63	49	34	33	32	64	53	52	34	92	48
Outubro	75	44	43	38	35	55	52	59	40	89	64
Novembro	69	49	32	44	34	47	51	46	53	64	63
Dezembro	65	34	38	54	39	46	52	43	58	65	60
<b>Total</b>	<b>697</b>	<b>500</b>	<b>431</b>	<b>394</b>	<b>368</b>	<b>591</b>	<b>561</b>	<b>552</b>	<b>438</b>	<b>880</b>	<b>576</b>

É relevante identificar se a energia entregue ao fluido de trabalho foi suficiente para suprir a demanda de aquecimento para a água atingir os 85 °C. A Tabela 4.11 representa a relação destas duas quantidades. Obteve-se que, na maioria das cidades, o recurso solar foi capaz de fornecer a energia demandada, ao longo de todo o ano. Valores abaixo dos 100% indicam que não foram todas as horas do mês em que houve suprimento desta demanda mínima. Porto Alegre obteve a menor média anual, seguida de Rio Pardo, que apresentou as maiores variações anuais.



#### 4.12 Regimes de Operação do Sistema de Aquecimento Solar

O modelo do SAM adotado considera que nas horas em que a temperatura de saída da água é menor que a temperatura de projeto, há recirculação do fluido de trabalho nos coletores. Quando a temperatura de projeto é atingida, a água é enviada ao processo (de pasteurização).

Entretanto, não são todas as horas em que a água fornece energia suficiente para suprir a demanda. Dessa forma, pode-se definir três momentos: horas de recirculação, horas em que o sistema fornece parcialmente energia e horas em que o fornecimento de energia é integral. A Figura 4.7 informa a porcentagem de tempo em que o sistema operou em cada modo. Ribeirão Preto se destacou, com cerca de 35% das horas operando sem sistema auxiliar, ou seja, aproximadamente 1022 h.

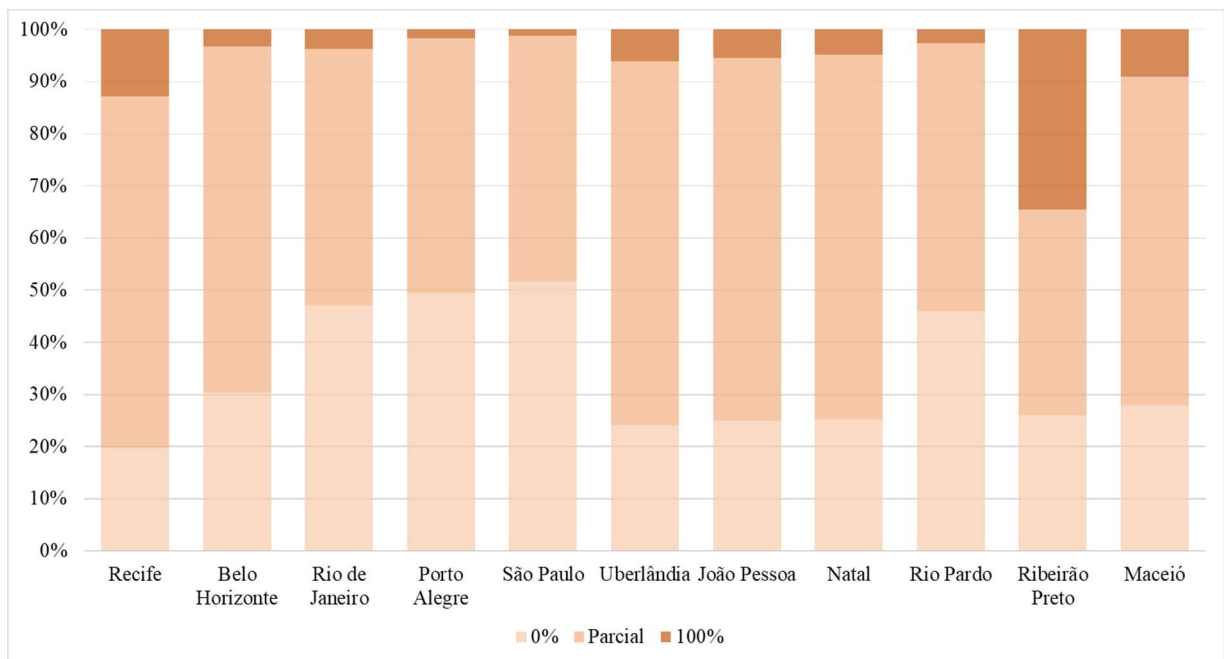


Figura 4.7 - Horas de operação em regime de circulação, fornecimento parcial e fornecimento integral de energia.

#### 4.13 Energia Auxiliar

De acordo com o que foi visto na seção anterior, o processo de pasteurização ainda dependerá de uma outra fonte de energia para ocorrer. A Figura 4.8 apresenta a energia auxiliar

anual necessária, bem como sua proporção em relação à energia entregue ao fluido de trabalho, ambas em MWh. O valor de 100% no gráfico corresponde aos 1437 MWh anuais demandados pelo processo. Percebe-se, novamente, o destaque de Ribeirão Preto frente às outras cidades, que supriu quase 70% da demanda. Com cerca de 55% de participação, Recife apresentou o segundo melhor resultado. Valores de irradiação menores nas cidades do Sul implicaram menor fornecimento de energia, assim como os regimes de chuva e dias nublados influíram no desempenho das outras cidades.

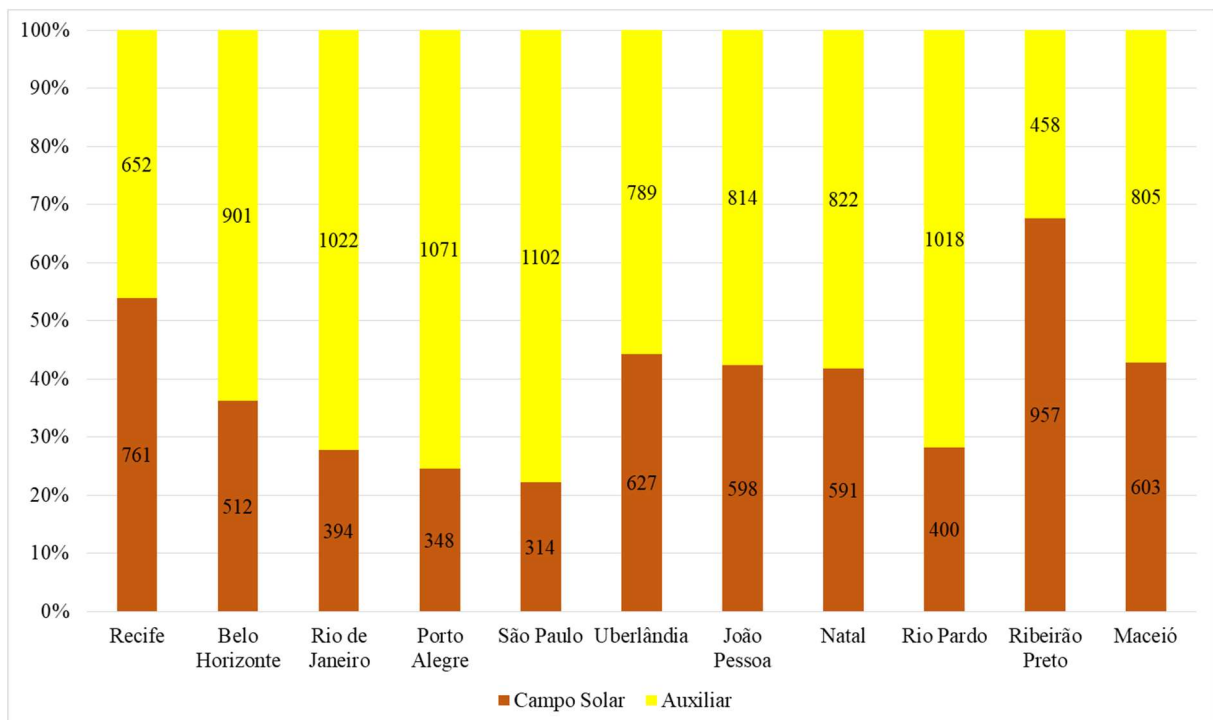


Figura 4.8 - Energia auxiliar demandada.

#### 4.14 Eficiências dos Coletores

De acordo com o que foi definido na Seção 3.6.5, as eficiências ópticas são definidas pelas relações entre energia incidente no campo solar, energia recebida pelo receptor e energia absorvida pelo escoamento. A Tabela 4.13 informa essas quantidades, bem como as eficiências calculadas pelas equações correspondentes. Nota-se que tanto as eficiências térmicas quanto ópticas são semelhantes em todas as cidades. Este comportamento é esperado, visto que os coletores são os mesmos nas localidades.

Conforme Montes et al., 2014, , as perdas térmicas no coletor LFR são inferiores às perdas ópticas para temperaturas abaixo dos 400°C. Isto está de acordo com o que foi encontrado na validação do estudo realizado por Sharma et al., 2015, i.e.,  $\eta_{\text{ótica}}$  de 45,6% e  $\eta_{\text{térmica}}$  de 77,2%. No presente estudo, este fato também ocorreu. Obteve-se uma eficiência térmica média de 95% e uma eficiência óptica média de 67%. A alta eficiência térmica ocorreu por estar se trabalhado com baixas temperaturas, menores de 100 °C.

Tem-se que aproximadamente 33% da energia incidente no coletor LFR não chega até o tubo evacuado receptor. Estas perdas ópticas são devidas ao espaçamento dos espelhos e perdas por efeito cosseno [Prasad et al., 2017], bloqueio [Sharma et al., 2015], bem como sujeira nos espelhos, características ópticas do coletor, imprecisão de rastreamento e montagem [Morin et al., 2012]. Quanto às perdas térmicas, elas se dão exclusivamente pelas características do receptor [Morin et al., 2012].

Tabela 4.13 - Energia anual absorvida, recebida e incidente, e eficiências dos coletores para as cidades avaliadas.

	Energia anual (MWh)			Eficiência média anual		
	Absorvida	Recebida	Incidente	Térmica	Óptica	Total
Recife	785	809	1212	97%	67%	65%
Belo Horizonte	536	569	856	94%	67%	63%
Rio de Janeiro	415	436	655	95%	67%	63%
Porto Alegre	366	398	597	92%	67%	61%
São Paulo	335	363	547	92%	66%	61%
Uberlândia	649	678	1017	96%	67%	64%
João Pessoa	623	644	965	97%	67%	65%
Natal	616	635	952	97%	67%	65%
Rio Pardo	419	451	679	93%	67%	62%
Ribeirão Preto	980	1015	1524	96%	67%	64%
Maceió	632	652	977	97%	67%	65%

#### 4.15 Biomassa Economizada

Tendo conhecimento da energia térmica transformada pelo sistema LFR, foi possível determinar a biomassa que é economizada anualmente. Na indústria de laticínios a principal fonte para geração térmica utilizada é a lenha [Lima et al., 2018]. A lenha seca, com 12% de água, apresenta um poder calorífico inferior, PCI, de 3680 kcal/kg [Alfa Laval, 2020b], ou 15.397,12 kJ/kg. Para uma análise mais conservadora, foi adotada uma eficiência de 100% na queima do combustível. Dessa forma, obtiveram-se os valores presentes na Tabela 4.14. A título de comparação, seriam necessárias 335,98 t para suprir a demanda anual de 1437 MWh.

Tabela 4.14 - Massa de combustível, em toneladas, economizada anualmente para cada cidade.

Cidade	Biomassa economizada (t)
Recife	183,54
Belo Horizonte	125,31
Rio de Janeiro	97,10
Porto Alegre	85,68
São Paulo	78,44
Uberlândia	151,66
João Pessoa	145,66
Natal	143,93
Rio Pardo	97,99
Ribeirão Preto	229,03
Maceió	147,72

#### 4.16 Análise Econômica

##### 4.16.1 Fluxo de Caixa

A primeira etapa na avaliação financeira é determinar o custo inicial do projeto. Khajepour e Ameri, 2020, utilizam valores para o campo solar de US\$ 170/m<sup>2</sup>, equivalente a



R\$ 916,30/m<sup>2</sup> com a cotação do dólar em R\$ 5,39 (28/04/2020). Gabrielli et al., 2014, identificaram competitividade de um pequeno campo solar linear Fresnel com custos abaixo de € 150/m<sup>2</sup>, equivalente a R\$ 880,50/m<sup>2</sup> considerando cotação do euro em R\$ 5,87 (28/04/2020). Para fins de simplificação, adotou-se um valor um pouco maior, de R\$ 950,00/m<sup>2</sup>. Tendo que a área total do empreendimento é de 1.267,2 m<sup>2</sup>, obtém-se um custo do campo solar de R\$ 1.203.840,00.

No presente trabalho foi considerado que não houve compra de terreno para instalação, mas que o sistema pode ser montado em terreno próprio da empresa ou então no telhado da indústria. A preparação do local para instalação foi de US\$ 20/m<sup>2</sup> [Khajepour e Ameri, 2020], que reflete em um custo de R\$ 136.604,16. Somado ao custo dos equipamentos e componentes do campo solar, tem-se um custo direto de R\$ 1.340.444,16. Como custos indiretos, considerou-se os referentes ao design e à construção. Conforme adotado por Khajepour e Ameri, 2020, este custo representa 11% dos custos diretos que resultam em R\$ 147.448,86. Finalmente, obteve-se o custo inicial do projeto pela soma dos custos diretos e indiretos: R\$ 1.487.893,02.

As entradas no fluxo de caixa são o valor monetário do que se economizou em lenha, combustível mais empregado neste tipo de operação no Brasil [Lima et al.]. Segundo Informativo CEPEA [CEPEA, 2020], o preço médio da biomassa é de R\$ 1.600/m<sup>3</sup>. Considerando a densidade de 489 kg/m<sup>3</sup> de eucalipto encontrada por Sturion, 1988, chega-se ao valor de R\$ 3,27/kg de lenha. Por fim, utilizando os valores da Tabela 4.14, obtém-se finalmente o custo evitado pelo uso do sistema de aquecimento solar, conforme Tabela 4.15. Considerando as 335,98 t de biomassa apresentadas na seção anterior, o custo anual da mesma seria de R\$ 1.099.337,13 a.a.

Quanto às saídas, o SAM considera custos fixos (R\$) e custos variáveis (R\$/kWh), que são dependentes ou não da capacidade instalada. Os custos fixos foram considerados como sendo as atividades de manutenção e operação do campo solar, e os variáveis foram englobados nestes custos para os cálculos.

Visto que a estrutura do coletor linear Fresnel é relativamente simples, os custos de O&M representam basicamente eventuais trocas de componentes e lavagem de espelhos [Morin et al., 2012]. Foi adotado o valor de € 4/m<sup>2</sup>, que resulta em R\$ 29.753,86 a.a. [Pauletta, 2016].

Quanto ao tempo de duração do projeto, Industrial Solar, 2020, informa que seus coletores duram mais de 20 anos. Visto não haver precisão ou garantia de quanto tempo a mais o sistema pode ser mantido operacional, considerou-se que tempo de vida útil será de 20 anos.

Tabela 4.15 - Valores monetários economizados pelo uso do campo solar.

Cidade	Valor Economizado
Recife	R\$ 600.555,41
Belo Horizonte	R\$ 410.007,24
Rio de Janeiro	R\$ 317.702,54
Porto Alegre	R\$ 280.358,28
São Paulo	R\$ 256.641,02
Uberlândia	R\$ 496.231,26
João Pessoa	R\$ 476.592,23
Natal	R\$ 470.935,75
Rio Pardo	R\$ 320.616,00
Ribeirão Preto	R\$ 749.370,22
Maceió	R\$ 483.351,74

#### 4.16.2 TIR

Após montado os fluxos de caixa, é possível se determinar a taxa interna de retorno, as quais estão na Tabela 4.16. A Taxa Interna de Retorno é o índice que zera o VPL, e assim indica qual é a maior TMA que pode ser escolhida a fim de tornar o investimento rentável. Dessa forma, ao se escolher a Taxa Mínima de Atratividade e compará-la à TIR já é possível identificar a vantagem ou desvantagem econômica do projeto.

Tabela 4.16 - Valores de TIR para as cidades estudadas.

Cidade	TIR
Recife	38%
Belo Horizonte	25%
Rio de Janeiro	25%
Porto Alegre	16%
São Paulo	14%
Uberlândia	31%
João Pessoa	30%

Continuação da Tabela 4.16 - Valores de TIR para as cidades estudadas.

Cidade	TIR
Natal	29%
Rio Pardo	19%
Ribeirão Preto	48%
Maceió	30%

A menor TIR encontrada foi para São Paulo, a cidade que menos entregou energia térmica. Aqui as cidades de Ribeirão Preto e Recife se destacaram, cujos resultados indicam possibilidade de altas taxas de atratividade.

#### 4.16.3 Valor Presente Líquido e Tempo de Retorno

A escolha da TMA foi realizada na comparação dos fundos de venture capital, na qual empresas investem em outras menores com potencial de crescimento e alta rentabilidade. Nos anos de 2010 a 2012 esta modalidade de investimento apresentou rentabilidade anual de 17% [Exame, 2014]. Segundo Infomoney, 2016, uma empresa aplicando nessa modalidade obteve rentabilidade média de 25% a.a. durante seus 4 primeiros anos de atuação. Dessa forma, a TMA utilizada nesta análise foi considerada com um valor intermediário de 20%.

A Figura 4.9 representa a evolução do VPL para os locais estudados. De maneira geral, as cidades obtiveram desempenhos econômicos positivos. Das onze cidades, quatro não se mostraram economicamente vantajosas: São Paulo, Porto Alegre, Rio Pardo e Rio de Janeiro. Com exceção de Recife, as cidades nordestinas apresentaram VPL próximos, entre R\$ 660.477,37 e R\$ 720.938,07. O maior retorno financeiro ocorreu em Ribeirão Preto, R\$ 2.016.336,26, seguido de Recife, R\$ 1.291.670,65.

Quanto ao tempo de retorno, variaram de quase 3 anos até pouco mais de 8 anos, com maior concentração de cidades próximo dos 6 anos de *payback*. Ressalta-se que no momento que se definiu a TMA do projeto já seria possível identificar quais cidades não apresentariam resultados econômicos positivos, pois suas taxas de atratividade estavam acima da TIR referente a seus fluxos de caixa.

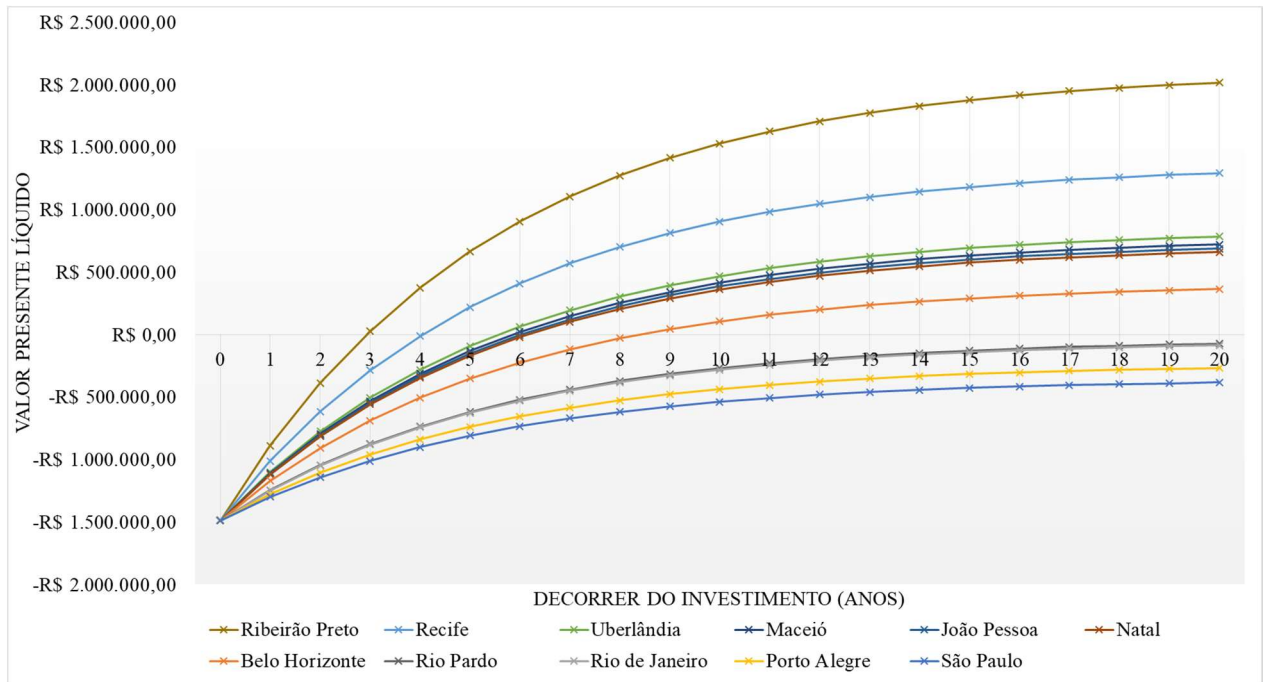


Figura 4.9 - Evolução do VPL para as cidades estudadas.

#### 4.16.4 LCOE

O cálculo do custo nivelado de energia é feito por meio da Equação 2.2, onde se considera a taxa fixa de retorno, FCR, investimento inicial, custos fixos e variáveis, e a energia produzida anualmente. Conforme discutido anteriormente, os custos variáveis foram englobados nos custos fixos na realização do cálculo. O FCR foi calculado pelo SAM com base em alguns parâmetros financeiros: o período de análise é o considerado o mesmo que o período do empréstimo, 20 anos. A inflação foi obtida com base no IPCA, Índice de Preços ao Consumidor Amplo [Portal Brasil, 2020], escolhida com base na média dos últimos 18 anos, que resultou em 6,12% a.a. A TMA foi de 20% a.a., e porcentagem de 70% do custo inicial foi financiada. Com base no que é informado pelo BNDES, os juros de empréstimo foram tomados como 12% a.a. Para os juros da construção foi considerada a mesma taxa. Todos estes dados resultaram em um FCR de 0,102.

Considerando a energia gerada anualmente, e utilizando a cotação do dólar de R\$ 5,39, obtém-se os valores de LCOE presentes na Tabela 4.17. Visto que os custos e o FCR são iguais para todos locais, a diferença entre os valores reside na energia térmica recebida do Sol. A tendência dos outros parâmetros segue, com Ribeirão Preto e Recife se destacando. Gabrielli

et. al, 2014, encontram valores entre € 0,02/kWh e € 0,12/kWh (R\$ 0,12/kWh e R\$ 0,70/kWh) no estudo de um pequeno sistema LFR, faixa em que se encontram todos os resultados.

Tabela 4.17 - Custo nivelado de energia.

Cidade	Energia entregue ao fluido (MWh)	LCOE (R\$/kWh)	LCOE (US\$/kWh)
Recife	785	0,23	0,04
Belo Horizonte	536	0,34	0,06
Rio de Janeiro	415	0,44	0,08
Porto Alegre	366	0,50	0,09
São Paulo	335	0,54	0,10
Uberlândia	649	0,28	0,05
João Pessoa	623	0,29	0,05
Natal	616	0,29	0,05
Rio Pardo	419	0,43	0,08
Ribeirão Preto	980	0,19	0,03
Maceió	632	0,29	0,05

Uma vantagem do LCOE é a possibilidade de comparar sistemas de diferentes tecnologias e fontes. Os dados aqui também se mostraram competitivos com usinas alimentadas por carvão, estudadas por Fan, 2019. Valores de LCOE entre 0,35 e 0,80 ¥/kWh foram apresentados, equivalente à faixa de R\$ 0,27/kWh e R\$ 0,62/kWh (cotação do Remimbi considerada R\$ 0,78 em (28/04/2020). Dessa forma, tem-se que os valores da Tabela 4.18 estão coerentes com os informados em outras fontes de energia.

Contudo, para o uso de gás natural, Gabrielli et al, 2014, apresentam um máximo de € 0,05/kW, equivalente a R\$ 0,23/kWh. Ainda, U.S. *Department of Energy*, 2013, apresenta uma comparação do LCOE de diversas tecnologias, onde sistemas com concentradores de energia solar variam de US\$ 0,10/kWh até US\$ 0,30/kWh (R\$ 0,54/kWh e R\$ 1,62/kWh). Portanto, mesmo que a tecnologia de captação solar possa ser vantajosa em determinados cenários, tem-se que ainda estão em desenvolvimento e requerem auxílios e políticas públicas para se tornarem mais competitivos financeiramente.

#### 4.16.5 Análise de Sensibilidade

A fim de identificar a influência dos parâmetros apresentados, foi realizada uma análise de sensibilidade. Para tal, assumiu-se como referência os dados até então utilizados e aplicou-se uma variação de 10%, para mais e para menos, e após avaliou-se o impacto destas variações. Inicialmente as consequências ao VPL foram observadas, e então o LCOE.

Os primeiros parâmetros analisados, que resultaram em maior sensibilidade do VPL, estão na Figura 4.10. No gráfico estão representados a variação do preço do campo solar, do preço da biomassa, da área total (mantida a área de espelhos dimensionada) e a TMA do projeto. O dado que ficou mais aparente é a alta sensibilidade do VPL para as cidades de Rio Pardo e Rio de Janeiro, com variações próximas de 180% para a primeira e 210% para a segunda. Este resultado é interessante, posto que ambas cidades não se mostraram economicamente viáveis. Assim, um pequeno ajuste em algum dos parâmetros poderia tornar o investimento vantajoso.

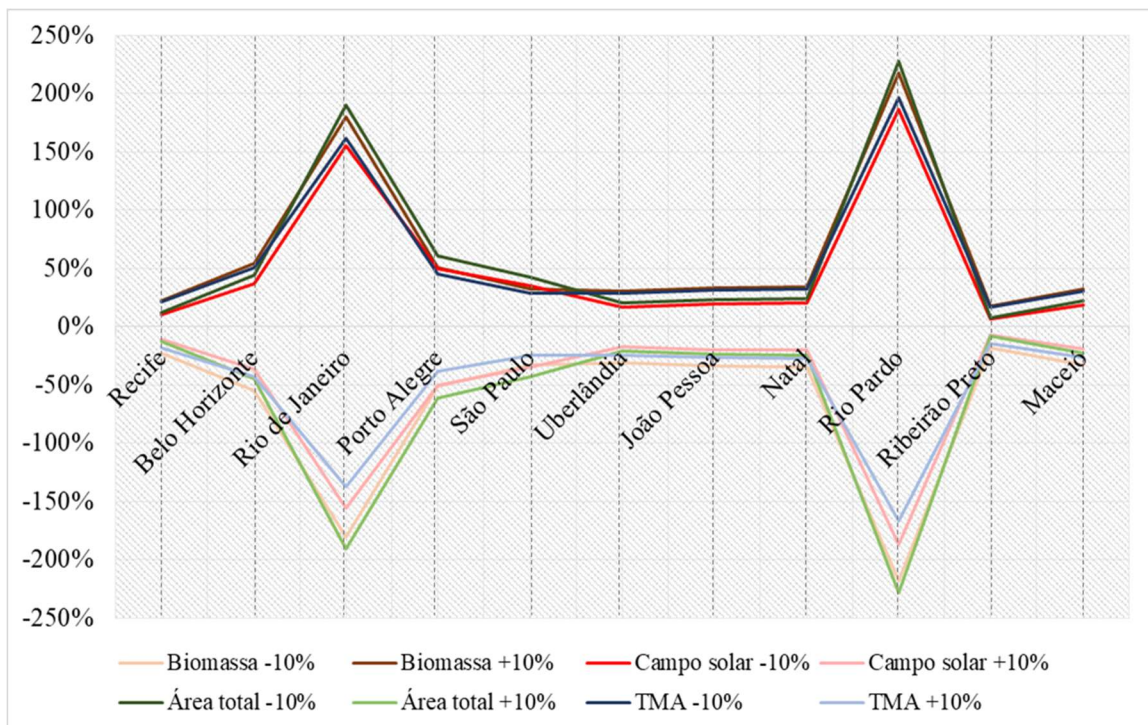


Figura 4.10 - Sensibilidade do VPL relativa aos parâmetros mais influentes.

Um olhar mais detalhado na figura anterior para as cidades que não foram vantajosas é apresentado na Figura 4.11. A maior sensibilidade do VPL foi encontrada para área total do campo solar, considerando constante a área reflexiva dimensionada. Lembrando que muitos

custos são considerados referentes à área ocupada (R\$/m<sup>2</sup>), é esperado que o valor presente líquido seja sensível a este parâmetro. Qualquer variação da área acarreta na mudança de vários itens como preparação do terreno e custos de O&M. Dessa forma, uma alternativa para estas cidades é buscar tornar o campo solar mais compacto. O preço da biomassa (R\$/m<sup>2</sup>) foi o segundo parâmetro mais impactante no VPL para as cidades que não foram economicamente viáveis.

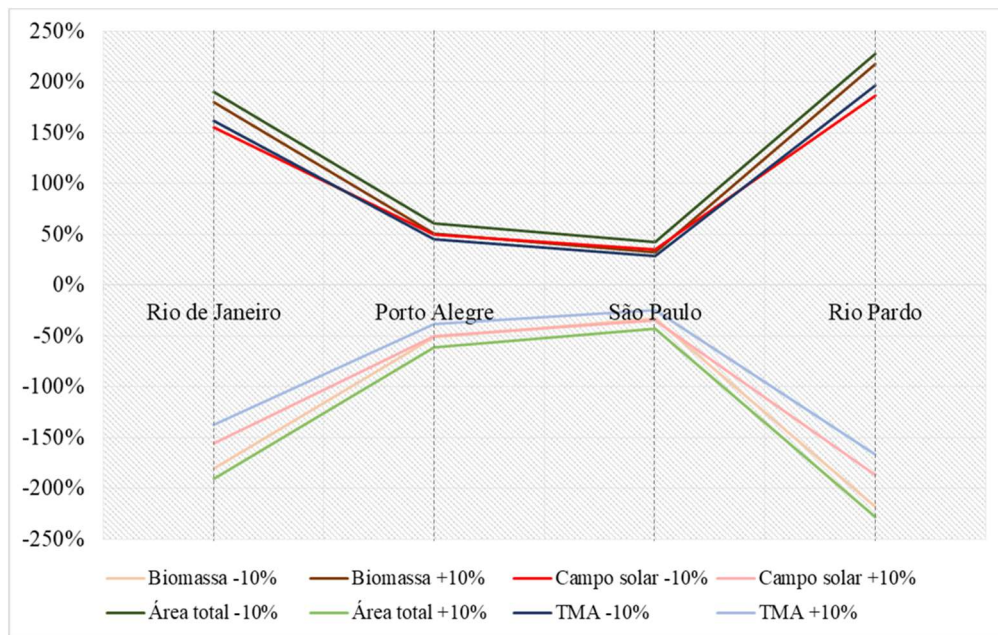


Figura 4.11 - Detalhe da sensibilidade do VPL para cidades não vantajosas economicamente.

O valor presente líquido no geral se mostrou mais sensível para o preço da biomassa, com variação média de 65%. A área total ocupada pelo campo solar foi o segundo parâmetro de maior impacto no VPL – 62% em média. Considerando apenas as cidades vantajosas economicamente este comportamento se mantém. As médias de variação foram de 33% e 23%, respectivamente para preço da biomassa e área total.

Outros parâmetros relevantes, referentes à operação e manutenção, tiveram seu impacto no VPL analisado. Na Figura 4.12 estão presentes variações nos custos de preparação do terreno, *design* e construção e também O&M. Novamente, há uma sensibilidade significativa para Rio Pardo e Rio de Janeiro em relação às outras localidades. Entretanto, estes parâmetros construtivos e operacionais não foram influenciáveis na mesma proporção que os anteriores – impacto médio de 6%.

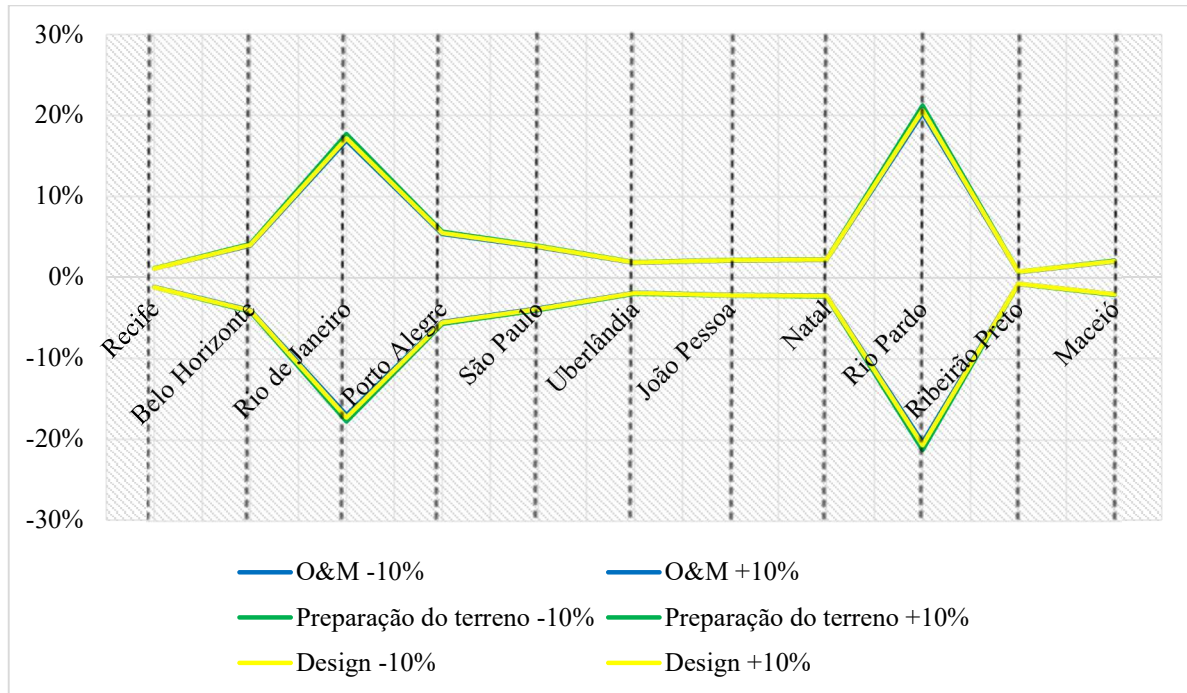


Figura 4.12 - Sensibilidade do VPL relativa à parâmetros construtivos e operacionais.

A sensibilidade do LCOE está presente na Tabela 4.18. Todas as cidades apresentaram a mesma variação para cada determinado parâmetro. A alteração da área total é a que apresentou maior impacto (10%), e o LCOE mostrou sensibilidade proporcional à variação deste valor. Conforme comentado anteriormente, vários custos são dados referente à área do campo solar. Assim, é esperado este parâmetro apresentar maior influência.

A variação do preço do campo solar também apresentou influência significativa no LCOE, com 8%. A taxa anual de inflação e a participação de empréstimo no investimento apresentaram impacto menos expressivo. Os demais parâmetros manifestaram variações quase nulas de LCOE. Para as outras especificações, que estão ausentes da tabela anterior, o custo nivelado de energia não apresentou sensibilidade.



Tabela 4.18 - Sensibilidade do LCOE.

	-10%	10%
Parâmetros	LCOE (R\$/kWh)	
Campo solar	-8%	8%
O&M	-2%	2%
Preparação do terreno	-1%	1%
Área total	-10%	10%
Design e construção	-1%	1%
Inflação	4%	-4%
Imposto de renda	1%	0%
Participação do empréstimo	-4%	4%

Em resumo, a análise desenvolvida aqui mostrou que a área total do campo solar é o parâmetro que desempenha maior potencial de elevar o retorno financeiro de cidades não vantajosas. Também, o valor monetário da biomassa apresentou impacto significativo no VPL. Pequenas variações nestes parâmetros, mesmo em cidades de menor recurso solar, poderiam tornar o projeto mais vantajoso e competitivo com outras tecnologias.

## 5 CONCLUSÕES

Tendo em vista a baixa quantidade de estudos acerca da utilização de energia solar térmica nas indústrias brasileiras, buscou-se neste trabalho avaliar a possibilidade do uso de um sistema de aquecimento solar aplicando água como fluido de trabalho. Foi adotado o setor de laticínios brasileiro, mais especificamente o processo de pasteurização, devido à demanda de temperaturas relativamente baixas. Especificando um sistema base com coletores do tipo linear Fresnel LF-11, seu desempenho em onze diferentes cidades do Brasil foi avaliado.

Utilizando o software *System Advisor Model* (SAM), foram realizadas simulações deste sistema, buscando avaliar parâmetros técnicos dos sistemas de aquecimento solar. Também, parâmetros econômicos foram analisados para cada local, a fim de identificar a viabilidade financeira dos projetos. O principal objetivo deste estudo foi determinar o desempenho térmico e financeiro de um sistema de aquecimento solar linear Fresnel para diferentes cidades brasileiras.

Para realizar o estudo do sistema linear Fresnel foi necessária uma demanda térmica. O processo de pasteurização do leite foi considerado para este fim. Para tal, foram selecionadas 11 cidades brasileiras que atendem aos requisitos de recurso solar e presença significativa deste setor. Com base em dados da indústria de leite foi encontrada uma demanda anual de 1006 MWh. Considerando perdas de 30% nas tubulações, obteve-se uma demanda térmica anual do sistema de aquecimento solar de 1437 MWh.

Os parâmetros econômicos foram obtidos por meio de simulações no *software* SAM. Com base no DNI, o dimensionamento resultante foi de 1.056 m<sup>2</sup> de área refletiva e 1.267,2 m<sup>2</sup> de terreno total. Teve-se que a energia solar entregue ao sistema de aquecimento variou de 335 MWh e 980 MWh, para São Paulo e Ribeirão Preto respectivamente. A porcentagem de suprimento da demanda do sistema chegou a 68% para Ribeirão Preto, seguido de Recife, com 55%.

A análise financeira mostrou resultados positivos para sete das onze cidades estudadas. Considerando duração do projeto de 20 anos os VPL positivos variaram de R\$ 363.781,13 a R\$ 2.016.336,26 nas cidades de Belo Horizonte (mínimo) e Ribeirão Preto (máximo). O tempo de retorno dos investimentos variou de 3 a 8 anos.

Quanto ao LCOE, valores variaram de R\$ 0,19/kWh a R\$ 0,54/kWh, faixa coerente com outros resultados encontrados para sistemas de aproveitamento da energia solar térmica. Por

fim, uma análise de sensibilidade foi realizada. Foi identificado que a área do campo solar é o parâmetro que mais impacta os valores de VPL e LCOE, seguido do seu preço por m<sup>2</sup>.

Dessa forma, o sistema linear Fresnel foi capaz de suprir uma parcela significativa da demanda anual na maior parte das cidades. Com isso, obteve-se também êxito na redução da queima de biomassa para o processo de aquecimento da água. Ainda, os resultados se mostraram competitivos com outras fontes de energia. Contudo, as tecnologias de aproveitamento solar são relativamente novas, ao se comparar com o uso de carvão ou outros combustíveis fósseis. Sendo assim, apesar dos resultados positivos obtidos, ainda são necessários mais estudos na área de energia solar, bem como incentivos fiscais e políticas públicas.

### **5.1 Sugestões para Trabalhos Futuros**

Para futuros trabalhos pode-se aplicar uma metodologia semelhante para outros setores da indústria. Também, seria interessante estender o estudo para outras cidades do país. Assim, seria possível montar um mapa com as cidades de melhor desempenho deste sistema linear Fresnel, bem como setores da indústria mais vantajosos. Ainda, a comparação dos dados aqui apresentados com resultados obtidos experimentalmente é um avanço positivo para este estudo.

## REFERÊNCIAS

Adarme-Mejia, L. M., Irizarry-Rivera, A. A. **Feasibility study of a linear Fresnel Concentrating Solar Power plant located in Ponce, Puerto Rico**. 2015 North American Power Symposium, NAPS 2015, p. 1–6, 2015.

Alfa Laval. **Front Line**. <https://www.alfalaval.com/products/heat-transfer/plate-heat-exchangers/gasketed-plate-and-frame-heat-exchangers/frontline/>. Acesso em 22-05-2020a.

Alfa Laval. **Poder Calorífico Inferior**. <http://www.aalborg-industries.com.br/downloads/poder-calorifico-inf.pdf>. Acesso em 22-05-2020b.

Allouhi, A., Agrouaz, Y., Benzakour Amine, M., Rehman, S., Buker, M. S., Kousksou, T.; Jamil, A., e Benbassou, A. Design optimization of a multi-temperature solar thermal heating system for an industrial process. **Applied Energy**, vol. 206, p. 382-392, 2017.

Baptista, G.; Pinto, A. D. R., Marques, C.Y.T., Roitman, F. B., e Lyra, D.D. Produção leiteira no Brasil. **BNDES**, vol. 37, p. 371–398, 2018.

Bayón-Cueli, C., Barbón, A., Bayón, L., e Barbón, N. A cost-energy based methodology for small-scale linear Fresnel reflectors on flat roofs of urban buildings. **Renewable Energy**, vol. 146, p. 944–959, 2020.

Bishoyi, D., e Sudhakar, K. Modeling and performance simulation of 100 MW PTC based solar thermal power plant in Udaipur India. **Case Studies in Thermal Engineering**, vol. 10, p. 216–226, 2017.

BNDES – Banco Nacional do Desenvolvimento. **Taxa de Juros**. <https://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/financiamento/guia/taxa-de-juros>. Acesso em 22-05-2020.

Brasil. **Decreto nº 9.579, de 22 de novembro de 2018**. Brasília, 2018.

Brasil. **Instrução Normativa nº 51, de 18 de setembro de 2002**. Brasília, 2002.

Belitz, H.D., Grosch, W., e Schieberle, P. **Food Chemistry**. Springer, Heidelberg, 2008.

Burin, E. L. K. **Plantas De Cogeração do Setor Sucroalcooleiro Assistidas por Concentradores Parabólicos**. Tese de doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina, 2015.

Cagnoli, M., Mazzei, D., Procopio, M., Russo, V., Savoldi, L., e Zanino, R. Analysis of the performance of linear Fresnel collectors: Encapsulated vs. evacuated tubes. **Solar Energy**, vol. 164, p. 119–138, 2018.

Cascaes, B. P. **Avaliação de Oportunidades do Uso de Energia Solar Térmica em Aplicações Industriais no Brasil**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2019.

CPEPA – Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada. **Informativo CEPEA - Setor Florestal**, nº 219, março, 2020.

Davis, A., e Kühnlenz, F. Optical design using Fresnel lenses: Basic principles and some practical examples. **Optik & Photonik**, vol. 2, p. 52–55, 2007.

Dellicompagni, P., Franco, J. Potential uses of a prototype linear Fresnel concentration system. *Renewable Energy*, vol. 136, p. 1044–1054, 2019.

Desai, D. D., Raol, J. B., Patel, S., e Chauhan, I. Application of solar energy for sustainable dairy development. **European Journal of Sustainable Development**, vol. 2, p. 131–140, 2013.

Dhotre, A. V. Milk pasteurization and equipment. **Animal Products Technology**, p.

51-78, 2014.

Duffie, J. A., e Beckman, W. A. **Solar Engineering of Thermal Processes**. John Wiley & Sons, Nova Jersey, 2013.

Elizondo-Salazar, J. A., e Heinrichs, A. J., Gelsinger, S. L. **Pasteurization of Non-Saleable Milk. PennState Extension**, 2013. <http://www.godkalven.no/produkter/handboeker-bruksanvisninger/alle-pdf/pasteurization-nonsaleable-milk-13-187.pdf>. Acesso em 22-05-2020.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. **ABC de Energia – Matriz Energética e Elétrica**. <http://epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>. Acesso em 22-05-2020.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética. **BEM - Balanço Energético Nacional: Relatório Final**, 2018.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética. **BEN - Balanço Energético Nacional: Relatório Síntese**, 2019.

Equilati. **Equipamentos Trocadores de Calor de Uso Industrial**. <http://www.equilati.com.br/equipamentos/trocadores-de-calor>. Acesso em 22-05-2020.

Exame. **Fundos de Private Equity rendem 17% ao ano**. <https://exame.com/seu-dinheiro/fundos-de-private-equity-tem-lucro-de-17-com-empresas-fecha/>. Acesso em 22-05-2020.

Fan, J. L., Wei, S., Yang, L., Wang, H., Zhong, P., e Zhang, X. Comparison of the LCOE between coal-fired power plants with CCS and main low-carbon generation technologies: Evidence from China. **Energy**, vol. 176, p. 143–155, 2019.

Farjana, S. H., Huda, N., Mahmud, M. A. P., e Saidur, R. Solar process heat in industrial systems – A global review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, vol. 82, p. 2270–

2286, 2018.

Forristall, R. Heat transfer analysis and modeling of a parabolic trough solar receiver implemented in Engineering Equation Solver. **NREL Technical Report**, 2003.

Gabbrielli, R., Castrataro, P., Medico, F. Del, Palo, M. Di, e Lenzo, B. Levelized cost of heat for linear Fresnel concentrated solar systems. **Energy Procedia**, vol. 49, p. 1340–1349, 2014.

Günther, M. Linear Fresnel technology. **ENERMENA Advanced CSP Teaching Materials**, 2011.

Industrial Solar. **Technical Data Industrial Solar linear Fresnel collector LF-11**, 2020. [https://www.industrial-solar.de/app/download/6944227811/Fresnel\\_technical\\_data.pdf?t=1508927021](https://www.industrial-solar.de/app/download/6944227811/Fresnel_technical_data.pdf?t=1508927021). Acesso em 22-05-2020.

InfoMoney. **“Investimento em venture capital é o Melhor no Longo Prazo”, Crava Executivo**. <https://www.infomoney.com.br/onde-investir/investimento-em-venture-capital-e-o-melhor-no-longo-prazo-crava-executivo/>. Acesso em 22-05-2020.

INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**, 2017. [http://labren.ccst.inpe.br/atlas\\_2017.html](http://labren.ccst.inpe.br/atlas_2017.html). Acesso em 22-05-2020.

IRENA - International Renewable Energy Agency. **Renewable Capacity Statistics 2020**. <https://www.irena.org/publications/2020/Mar/Renewable-Capacity-Statistics-2020>. Acesso em 25-06-2020.

Jamar, A., Majid, Z. A. A., Azmi, W. H., Norhafana, M., e Razak, A. A. A review of water heating system for solar energy applications. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, vol. 76, p. 178–187, 2016.

Jia, T., Huang, J., Li, R., He, P., e Dai, Y. Status and prospect of solar heat for industrial processes in China. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, vol. 90, p. 475–489, 2018.

Karagiorgas, M., Botzios, A., Tsoutsos, T. Industrial solar thermal applications in Greece. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, vol. 5, p. 157–173, 2001.

Kalogirou, S. A. **Engenharia de Energia Solar**. Elsevier, Rio de Janeiro, 2016.

Kempener, R. (org). Solar heat for industrial processes: Technology Brief". **IEA-ETSAP & IRENA**, vol. 17, p. 216–260, 2015.

Lauterbach, C., Schmitt, B., Jordan, U., e Vajen, K. The potential of solar heat for industrial processes in Germany, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, vol. 16, p. 5121-5130, 2012.

Li, Q., Tehrani, S. S. M., e Taylor, R. A. Techno-economic analysis of a concentrating solar collector with built-in shell and tube latent heat thermal energy storage. **Energy**, vol. 121, p. 220–237, 2017.

Liaqat, K., Ali, A., e Mengal, A. N. Design and simulation of molten salt based solar thermal power plant using LFR technology in Pakistan. **2018 International Conference on Computing, Electronic and Electrical Engineering, ICE Cube 2018**, p. 1–6, 2019.

Lima, L. P. De, Ribeiro, G. B. de D., e Perez, R. The energy mix and energy efficiency analysis for Brazilian dairy industry. **Journal of Cleaner Production**, vol. 181, p. 209–216, 2018.

Lima, L. P. D. E., Perez, R., e Chaves, J. B. P. C. A indústria de laticínios no brasil – um estudo exploratório. **Boletim do Centro de Pesquisa de Processamento de Alimentos**, v. 35, p. 1–13, 2017.

Maryland Metrics. **Technical Data Chart: International Material Grade**



**Comparison Table, 2020.**

Meunier-goddik, L e Sandra, S. Liquid milk products : Pasteurized milk. **Elsevier Reference Module in Food Sciences**, p. 1-7, 2016.

Montes, M. J., Rubbia, C., Abbas, R., Martínez-Val, J. M. A comparative analysis of configurations of linear Fresnel collectors for concentrating solar power. **Energy**, vol. 73, p. 192–203, 2014.

Morin, G., Dersch, J., Platzer, W., Eck, M., e Häberle, A. Comparison of linear Fresnel and parabolic trough collector power plants. **Solar Energy**, vol. 86, p. 1–12, 2012.

Müller, H., Brandmayr, S., e Zörner, W. Development of an evaluation methodology for the potential of solar-thermal energy use in the food industry. **Energy Procedia**, vol. 48, p. 1194-1201, 2014.

Newnan, D. G., Eschenbach, T. G., e Lavelle, J. P. **Engineering Economic Analysis**. Oxford University Press, Nova Iorque, 2004.

NREL – National Renewable Energy Laboratory. **Software SAM – System Advisor Model**. Versão 2017.9.5.

Packey, D. J. **Market Penetration of New Energy Technologies**. NREL, Golden, 1993.

Pauletta, S. A solar Fresnel collector based on an evacuated flat receiver. **Energy Procedia**, vol. 101, p. 480-487, 2016.

Panchal, H., Patel, R., Chaudhary, S., Patel, D. K., Sathyamurthy, R., e Arunkumar, T. Solar energy utilisation for milk pasteurisation: A comprehensive review, **Renewable and Sustainable Energy Review**, vol. 92, p. 1-8, 2018.

Pietruschka, D., Fedrizzi, R., Orioli, F., Söll, R., e Stauss, R. Demonstration of three large scale solar process heat applications with different solar thermal collector technologies. **Energy Procedia**, vol. 30, p. 755-764, 2012.

Pigozzo Filho, V. C., De Sá, A. B., Souza, S. S., e Passos, J. C. Projeto , construção e testes de um protótipo concentrador solar Fresnel linear para geração direta de vapor para processos industriais. **VII Congresso Brasileiro de Energia Solar**, 2018.

Pirasteh, G., Saidur, R., Rahman, S. M. A., e Rahim, N. A. A review on development of solar drying applications. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, vol. 31, p. 133–148, 2014.

Portal Brasil. **Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo – IPCA**. <https://www.portalbrasil.net/ipca.htm>. Acesso em 22-05-2020.

Prasad, G. S. C., Reddy, K. S., e Sundararajan, T. Optimization of solar linear Fresnel reflector system with secondary concentrator for uniform flux distribution over absorber tube. **Solar Energy**, vol. 150, p. 1–12, 2017.

Rahman, M. S. **Hanbook of Food Preservation**. CRC Press, Boca Raton, 2007.

Ramírez, C. A., Patel, M., Blok, K. From fluid milk to milk powder: Energy use and energy efficiency in the European dairy industry. **Energy**, vol. 31, p. 1984–2004, 2006.

Receita Federal, Brasil. **IRPJ (Imposto sobre Renda de Pessoas Jurídicas)**. <http://receita.economia.gov.br/acesso-rapido/tributos/IRPJ>. Acesso em 22-05-2020.

Schott. **Schott PTR 70 Receivers Datasheet**, 2020.

Serenar. **O que é Lente Fresnel?** <https://serenarseguranca.com.br/o-que-e-lente-de-fresnel/>. Acesso em 22-05-2020.

Sharma, A. K., Sharma, C., Mullick, S. C., Kandpal, T. C. Financial viability of solar industrial process heating and cost of carbon mitigation: A case of dairy industry in India. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, vol. 27, p. 1–8, 2018.

Sharma, A. K., Sharma, C., Mullick, S. C., e Kandpal, T. C. Potential of solar industrial process heating in dairy industry in India and consequent carbon mitigation. **Journal of Cleaner Production**, Journal of Cleaner Production, vol. 140, p. 714-724, 2017.

Sharma, V., Nayak, J. K., e Kedare, S. B. Effects of shading and blocking in compact linear fresnel reflector field. **Energy**, vol. 113, p. 114–138, 2015.

Short, W., Packey, D. J., e Holt, T. **A Manual for the Economic Evaluation of Energy Efficiency and Renewable Energy Technologies**. NREL, Golden, 1995.

Silva, P. H. F. Da. **Leite: Aspectos de composição e propriedades. Química Nova na Escola**, vol. 6, p. 3–5, 1997.

Singh, P. L., Ganesan, S., e Yàdav, G. C. Performance study of a linear Fresnel concentrating solar device. **Renewable Energy**, vol. 18, p. 409–416, 1999.

SolarPACES. **CSP Project Development in Australia**. <https://www.solarpaces.org/csp-technologies/csp-potential-solar-thermal-energy-by-member-nation/australia>. Acesso em 22-05-2020.

Sturion, J. A., Pereira, J. C. D., e Chemim, M. S. Qualidade da madeira de *Eucalyptus viminalis* para fins energéticos em função do espaçamento e idade de corte. **Boletim de Pesquisa Florestal**, vol. 16, p. 55-59, 1988.

Sun, D. W. **Handbook of Food Safety Engineering**, Wiley-Blackwell, Chicester, 2012.

Suresh, N. S., Rao, B. S. Solar energy for process heating: A case study of select Indian industries. **Journal of Cleaner Production**, vol. 151, p. 439–451, 2017.

Thulukkanam, K. **Heat Exchanger Design Handbook**, CRC Press, Boca Raton, 2013.

U.S. Department of Energy, Office of Indian Energy. **Levelized Cost of Energy (LCOE)**. <https://www.energy.gov/>. Acesso em 22-05-2020.

Wagner, M. e Gilman, P. **Technical Manual for the SAM Physical Trough Model**, 2011. <https://www.nrel.gov/docs/fy11osti/51825.pdf>. Acesso em 22-05-2020.

Wagner, M. J., e Zhu, G. A direct-steam linear fresnel performance model for NREL's system advisor model. **ASME ESFuelCell - 6<sup>th</sup> International Conference on Energy Sustainability & 10<sup>th</sup> Fuel Cell Science, Engineering and Technology Conference**, 2012.

Wagner, M. Modeling Parabolic Trough Systems. **SAM Webniar**, 2014. [https://sam.nrel.gov/images/webinar\\_files/sam-webinars-2014-parabolic-trough-systems.pdf](https://sam.nrel.gov/images/webinar_files/sam-webinars-2014-parabolic-trough-systems.pdf). Acesso em 22-05-2020.

Wagner, M. Results and Comparison from the SAM Linear Fresnel Technology Performance Model. **2012 World Renewable Energy Forum**, Denver, Colorado, 2012. <https://www.nrel.gov/docs/fy12osti/54758.pdf>. Acesso em 26/05/2020.

Walstra, P. , Wouters, J. T. M., e Geurts, T. J.. **Dairy Science and Technology**. CRC Press, Boca Raton, 2006.

Xie, W. T., Dai, Y. J., Wang, R.Z. e Sumathy, K. Concentrated solar energy applications using Fresnel lenses: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, vol. 15, p. 2588-2606, 2011.

## ANEXO A – Folha de Dados do Coletor LF-11

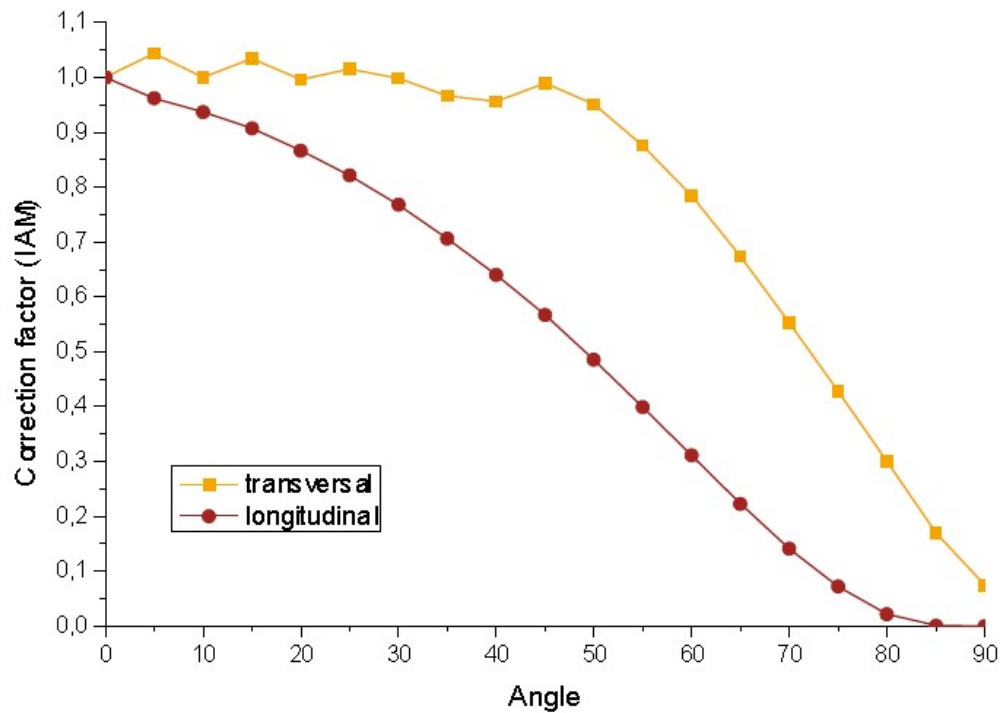


Figura A.1 - Gráfico referente à correção dos ângulos de incidência longitudinal e transversal [Industrial Solar, 2020].

Tabela A.1 - Tabela de correção dos ângulos de incidência longitudinal e transversal [Industrial Solar, 2020].

Angle	Transversal	Longitudinal
00	1.000	1.000
05	1.044	0.962
10	1.000	0.937
15	1.034	0.907
20	0.996	0.867
25	1.015	0.821
30	0.998	0.768
40	0.956	0.640
50	0.951	0.485
60	0.784	0.311
70	0.553	0.141
80	0.300	0.022
90	0.075	0.000

## ANEXO B – Folha de Dados do Receptor PTR 70

Tabela B.1 - Especificações técnicas do receptor Schott PTR 70 [Schott, 2020].

Components	Specification
Dimension	<ul style="list-style-type: none"> <li>length: 4060 mm at 20°C ambient temperature (159.8 inches at 68°F)</li> <li>aperture length: &gt; 96.7% of the bulk length at 350°C/662°F working temperature</li> </ul>
Absorber	<ul style="list-style-type: none"> <li>outer diameter: 70 mm/ 2.75 inches</li> <li>steel-type: DIN 1.4541 or similar</li> <li>solar absorptance:               <ul style="list-style-type: none"> <li><math>\alpha_{100} \geq 95.5\%</math></li> <li><math>\alpha_{1.5\mu\text{m}} \geq 96\%</math></li> </ul> </li> <li>thermal emittance: <math>\varepsilon \leq 9.5\%</math></li> </ul>
Glass envelope	<ul style="list-style-type: none"> <li>Borosilicate glass</li> <li>outer diameter: 125 mm/4.9 inches</li> <li>antireflective coating</li> <li>solar transmittance: <math>\tau \geq 97\%</math></li> </ul>
Thermal losses	<ul style="list-style-type: none"> <li>in conjunction with SCHOTT Solar CSP patented shields</li> <li>&lt; 250 W/m (@ 400 °C)</li> <li>&lt; 165 W/m (@ 350 °C)</li> <li>&lt; 110 W/m (@ 300 °C)</li> <li>&lt; 70 W/m (@ 250 °C)</li> </ul>
Vacuum	<ul style="list-style-type: none"> <li>residual gas pressure: <math>\leq 10^{-3}</math> mbar</li> </ul>
Heat transfer fluid	<ul style="list-style-type: none"> <li>non-corrosive thermal oil with an effective partial pressure of dissolved Hydrogen of <math>p_{\text{H}_2} &lt; 30</math> Pa</li> </ul>
Operating pressure	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>\leq 41</math> bar (absolute)</li> </ul>