

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

AVALIAÇÃO DE OPORTUNIDADES DO USO DE ENERGIA SOLAR TÉRMICA EM
APLICAÇÕES INDUSTRIAIS NO BRASIL

por

Bruno Polydoro Cascaes

Dissertação para a obtenção do Título de

Mestre em Engenharia

Porto Alegre, Abril de 2019

AVALIAÇÃO DE OPORTUNIDADES DO USO DE ENERGIA SOLAR TÉRMICA EM
APLICAÇÕES INDUSTRIAIS NO BRASIL

por

Bruno Polydoro Cascaes
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

Orientadora: Profa. Dra. Letícia Jenisch Rodrigues

Aprovada por:

Prof. Dr. Andrés Armando Mendiburu Zevallos PROMEC/UFRGS

Prof. Dr. Cirilo Seppi Bresolin DEMEC/UFRGS

Prof. Dr. Paulo Smith Schneider PROMEC/UFRGS

Prof. Dr. Fernando Marcelo Pereira
Coordenador do PROMEC

Porto Alegre, 05 de Abril de 2019

*Up onto the overturned keel
clamber, with a heart of steel
cold is the ocean's spray
and your death is on its way
with maidens you had your way
Each must die someday!*

Þórir Jökull, 1238

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha orientadora, Prof. Dra. Letícia Jenisch Rodrigues, por toda a atenção, dedicação e ensinamentos compartilhados, ao longo destes anos de mestrado. Também agradeço aos colegas da sala 203 pela amizade, opiniões, e todos os cafés, bolos e chás compartilhados.

A minha namorada Nicole, por todo amor, compreensão, e companheirismo, essenciais não somente na elaboração deste trabalho, como em tantos outros momentos de nossas vidas.

Ao meu pai, José Carlos Cascaes, por me apoiar em mais esta etapa da minha vida acadêmica.

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

.

RESUMO

O consumo de energia pela indústria se dá, em sua maioria, na forma de calor. Sendo responsável por mais de um terço da energia consumida no mundo, as emissões causadas pela queima de combustíveis são motivo de preocupação no setor. Desta forma, o uso de energia limpa para este fim atrai cada vez mais atenção. Estudos acerca do potencial de utilização de sistemas de aquecimento solar, por diferentes setores industriais, são realizadas ao redor do mundo. Para isso, entretanto, é necessária uma primeira avaliação dos setores e seus processos. O objetivo principal da presente dissertação é identificar setores com potencial de aplicação de energia solar em processos industriais (*Solar Heat for Industrial Processes – SHIP*). Com base em dados de literatura, são analisadas as demandas térmicas dos principais processos de diferentes setores. Nesse momento, selecionaram-se os seguintes setores: alimentício, têxtil, químico, e de papel e celulose. Ao identificar setores promissores, ou seja, aqueles cujos processos demandam temperaturas dentro da faixa de operação dos coletores solares térmicos disponíveis, busca-se, então, dados sobre o consumo energético dos mesmos. Com isso é possível identificar os combustíveis, ou fontes de calor, a serem substituídas pela energia solar. Em seguida, a localização das indústrias é relacionada com os valores de irradiação solar média anual disponíveis. Esta relação permite a escolha do tipo de coletor que oferece o melhor desempenho em cada região, e que atenda à demanda das indústrias. Adicionalmente, dados sobre instalações que aderiram ao uso de SHIP ao redor do mundo são analisados. Esses exemplos de aplicações, ao apresentar o padrão existente nas instalações, validam as conclusões acerca dos setores nacionais. Dentre os setores avaliados, o que possui maior investimento em ativos imobilizados é o setor de papel e celulose, sendo seguido pelos setores químico, de carnes, de laticínios e têxtil. O setor químico é o que apresenta a demanda térmica mais elevada, sendo indicado o uso de coletores concentradores. Dentre as regiões do país, nas quais existem instalações desse setor, os estados de MG e CE se destacam por possuírem alta irradiação média diária horizontal anual. O setor têxtil apresentou o menor potencial, por investir menos e pela concentração de suas indústrias, em SC, se localizar em uma área de baixa irradiação média anual. Para os setores alimentícios, o uso de coletores estacionários é possível em diversos estados, como por exemplo, SP, MG e RS.

Palavras-chave: Energia Solar Térmica; Avaliação de Potencial; Energia Solar Térmica para Processos Industriais.

ABSTRACT

The energy consumption by the industry is mostly in the form of heat. Being responsible for over a third of the global total final energy use, the emissions caused by the burning fuels are cause for concern in the sector. In this way, the use of clean energy for this purpose attracts more and more attention. Studies about the potential of using solar heating systems, by different industrial sectors, are carried out around the world. For this, however, a first evaluation of the sectors and their processes is necessary. The objective of this dissertation is to identify sectors with potential of applying Solar Heat for Industrial Processes (SHIP). Based on literature data, the thermal demands of the main processes of different sectors are analyzed. At this moment, the following sectors are selected: food, textile, chemical, pulp and paper. By identifying promising sectors, i.e. those whose processes demand temperatures within the range of available collectors, data are then sought on their energy consumption. With this it is possible to identify the fuels, or sources of heat, to be replaced by solar energy. Next, the location of the industries is related to the available average annual solar irradiance values. This allows to relate the choice of the type of collector that offers the best performance in each region, and that meets the demand of the industries. In addition, data on facilities that have adhered to the use of SHIP around the world are analyzed. These examples of applications, by presenting the existing pattern of installations, validate the conclusions made on the national sectors. Among the evaluated sectors, the largest investment in fixed assets is the paper and pulp sector, followed by the chemical, meat, dairy and textile sectors. The chemical sector has the highest thermal demand, and the use of concentrating collectors is indicated. Among the regions of the country, in which there are facilities of this sector, the MG and CE states stand out for having high annual average annual horizontal irradiation. The textile sector had the lowest potential, due to its lower investment and the concentration of its industries in an area of low annual average irradiance, in the SC state. For the food sectors, the use of stationary collectors is possible in several states, such as SP, MG and RS.

Keywords: Solar thermal energy; Solar and financial potential evaluation; Solar heat for industrial processes

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Revisão Bibliográfica	2
1.2	Questão foco	4
1.3	Organização do Trabalho4
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1	Coletores solares	5
2.2	<i>Solar Heat for Industrial Processes (SHIP)</i>	8
2.2.1	Indústria química	10
2.2.2	Indústria têxtil	12
2.2.3	Indústria do papel e celulose	15
2.2.4	Indústria alimentícia	16
2.2.4.1	Indústria alimentícia: laticínios	17
2.2.4.2	Indústria alimentícia: carne	19
3	METODOLOGIA	21
3.1	Consumo energético	21
3.2	Impacto econômico	22
3.3	Sistemas SHIP instalados no mundo	22
3.4	Comparativo entre temperaturas de processo	23
3.5	Disponibilidade do recurso solar	23
4	APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	24
4.1	Apresentação dos resultados	24
4.1.1	Consumo energético	24
4.1.2	Impacto econômico	29

4.1.3	Sistemas SHIP instalados no mundo	36
4.1.4	Comparativo entre temperaturas de processo	37
4.1.5	Disponibilidade do recurso solar	39
4.1.5.1	Indústria química	39
4.1.5.2	Indústria têxtil	41
4.1.5.3	Indústria do papel e celulose	43
4.1.5.4	Indústria alimentícia: laticínios	45
4.1.5.5	Indústria alimentícia: carne	47
4.2	Discussão dos resultados	50
5	CONCLUSÕES	59
5.1	Trabalhos futuros	61
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	62
APÊNDICE A	Indústrias com instalações de SHIP no mundo	69

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1	Fluxograma da metodologia empregada	21
Figura 4.1	Consumo energético das indústrias brasileiras, destacando os combustíveis utilizados para geração de calor. [Adaptado de EPE, 2018]	25
Figura 4.2	Consumo energético do setor químico, destacando os combustíveis utilizados para geração de calor. [Adaptado de EPE, 2018]	26
Figura 4.3	Consumo energético do setor têxtil, destacando os combustíveis utilizados para geração de calor. [Adaptado de EPE, 2018]	26
Figura 4.4	Consumo energético do setor de papel e celulose, destacando os combustíveis utilizados para geração de calor. [Adaptado de EPE, 2018]	27
Figura 4.5	Consumo energético do setor de alimentos e bebidas, destacando os combustíveis utilizados para geração de calor. [Adaptado de EPE, 2018]	28
Figura 4.6	Consumo energético do setor de alimentos e bebidas, desconsiderando a indústria sucroalcooleira, destacando os combustíveis utilizados para geração de calor. [Adaptado de EPE, 2018]	28
Figura 4.7	Porcentagem de participação dos setores avaliados no PIB industrial nacional. [Adaptado de CNI, 2018]	29
Figura 4.8	Contribuição de cada região, em porcentagem, no PIB industrial nacional. [Adaptado de CNI, 2018]	31
Figura 4.9	UFs com maior participação do setor alimentício em seu PIB. [Adaptado de CNI, 2018]	32
Figura 4.10	UFs com maior participação do setor de papel e celulose em seu PIB. [Adaptado de CNI, 2018]	33
Figura 4.11	UFs com maior participação do setor químico em seu PIB. [Adaptado de CNI, 2018]	34
Figura 4.12	UFs com maior participação do setor têxtil em seu PIB. [Adaptado de CNI, 2018]	35

Figura 4.13	Investimentos em ativos imobilizados pelos setores estudados. [Adaptado de IBGE, 2016]	36
Figura 4.14	Instalações existentes no mundo, para os setores avaliados, em termos dos tipos de coletores térmicos utilizados. [Adaptado de IEA, 2018]	37
Figura 4.15	Localidades com mais de dez indústrias do setor químico em mapa que apresenta a média anual do total diário da irradiação solar direta horizontal. [Adaptado de IBGE, 2015 e Pereira et al., 2017]	40
Figura 4.16	Localidades com mais de dez indústrias do setor químico em mapa que apresenta a média anual do total diário da irradiação solar no plano inclinado da latitude. [Adaptado de IBGE, 2015 e Pereira et al., 2017]	41
Figura 4.17	Localidades com mais de dez indústrias do setor têxtil em mapa que apresenta a média anual do total diário da irradiação solar direta horizontal. [Adaptado de IBGE, 2015 e Pereira et al., 2017]	42
Figura 4.18	Localidades com mais de dez indústrias do setor têxtil em mapa que apresenta a média anual do total diário da irradiação solar no plano inclinado da latitude. [Adaptado de IBGE, 2015 e Pereira et al., 2017]	43
Figura 4.19	Localidades com mais de dez indústrias do setor de papel e celulose em mapa que apresenta a média anual do total diário da irradiação solar direta horizontal. [Adaptado de IBGE, 2015 e Pereira et al., 2017]	44
Figura 4.20	Localidades com mais de dez indústrias do setor de papel e celulose em mapa que apresenta a média anual do total diário da irradiação solar no plano inclinado da latitude. [Adaptado de IBGE, 2015 e Pereira et al., 2017]	45
Figura 4.21	Localidades com mais de dez indústrias do setor de laticínios em mapa que apresenta a média anual do total diário da irradiação solar direta horizontal. [Adaptado de IBGE, 2015 e Pereira et al., 2017]	46
Figura 4.22	Localidades com mais de dez indústrias do setor de laticínios em mapa que apresenta a média anual do total diário da irradiação solar	

	no plano inclinado da latitude. [Adaptado de IBGE, 2015 e Pereira et al., 2017]	47
Figura 4.23	Localidades com mais de dez indústrias do setor da carne em mapa que apresenta a média anual do total diário da irradiação solar direta horizontal. [Adaptado de IBGE, 2015 e Pereira et al., 2017]	48
Figura 4.24	Localidades com mais de dez indústrias do setor da carne em mapa que apresenta a média anual do total diário da irradiação solar no plano inclinado da latitude. [Adaptado de IBGE, 2015 e Pereira et al., 2017]	49
Figura 4.25	Em destaque regiões de alta irradiação média diária horizontal anual (em preto) e baixa irradiação média diária horizontal (em vermelho) para o setor de produtos químicos. [Adaptado de IBGE, 2015 e Pereira et al., 2017]	51
Figura 4.26	Em destaque regiões de alta irradiação média diária horizontal anual (em preto) e baixa irradiação média diária horizontal (em vermelho) para o setor têxtil. [Adaptado de IBGE, 2015 e Pereira et al., 2017]....	52
Figura 4.27	Em destaque regiões de alta irradiação média diária horizontal anual (em preto) e baixa irradiação média diária horizontal (em vermelho) para o setor de papel e celulose. [Adaptado de IBGE, 2015 e Pereira et al., 2017]	54
Figura 4.28	Em destaque regiões de alta irradiação média diária anual no plano da latitude (em preto) para o setor de laticínios. [Adaptado de IBGE, 2015 e Pereira et al., 2017]	56
Figura 4.29	Em destaque regiões de alta irradiação média diária anual no plano inclinado da latitude (em preto) para o setor de carnes. [Adaptado de IBGE, 2015 e Pereira et al., 2017]	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Principais características dos coletores solares utilizados em processos de aquecimento na indústria. [Traduzido de Kalogirou, 2014]	8
Tabela 2.2	Temperaturas de processos industriais. [Adaptado de Farjana et al., 2018a; Kalogirou, 2014; Sharma et al., 2017b]	9
Tabela 4.1	Resumo dos principais resultados da seção	29
Tabela 4.2	Participação de cada UF na composição do PIB industrial nacional, da indústria no PIB de cada UF, e dos setores de interesse no PIB industrial das UF. [Adaptado de CNI, 2018]	30
Tabela 4.3	Temperaturas de operação dos coletores e de processos dos setores avaliados. [Adaptado de Farjana et al., 2018a; Kalogirou, 2014; Sharma et al., 2017b]	38
Tabela 4.4	Principais oportunidades observadas, apontando para cada setor avaliado: o tipo de coletor a aplicar, a irradiação na UF e o valor do PIB gerado pelo setor na mesma.	58

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

CPC	<i>Compound parabolic collector</i>
CTC	<i>Cylindrical trough collector</i>
EIA	<i>Energy Information Administration</i>
ETC	<i>Evacuated tube collector</i>
FPC	<i>Flat plate collector</i>
HFC	<i>Heliostat field collector</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IEA	<i>International Energy Agency</i>
LFR	<i>Linear Fresnel reflector</i>
PDR	<i>Parabolic dish reflector</i>
PIB	Produto Interno Bruto
PTC	<i>Parabolic trough collector</i>
RC	Razão de Concentração
SHIP	<i>Solar Heat for Industrial Processes</i>
SAS	Sistema de Aquecimento Solar
UF	Unidade Federativa

LISTA DE SÍMBOLOS

ΔT_{op} Intervalo de temperatura de operação [°C]

1 INTRODUÇÃO

A energia solar térmica atende hoje menos de 1% da demanda de calor mundial. Com mais de 95% das instalações no setor da construção civil, seu uso se concentra no aquecimento doméstico de água. Assim, a energia solar térmica possui ainda uma participação pouco expressiva no mercado mundial. Neste cenário, o Brasil possui 2% da capacidade instalada no mundo. Porém, já demonstrou uma expansão no setor industrial, visto que em 2014, 17% das novas instalações foram destinadas a este setor [IEA, 2017].

No Brasil a indústria contribui com 16,7% do total do PIB, e é responsável por 32,9% da energia consumida no país [EPE, 2018], sendo 80% deste valor destinado à geração de calor [Pereira, 2018]. Em escala global, o setor industrial é responsável por 55% da energia consumida [EIA, 2017]. A geração de calor de processo contabiliza mais de dois terços desse consumo [Kempener et al., 2015]. Este valor se aproxima daqueles encontrados por outros estudos, que também avaliaram a parcela do consumo de energia destinada à geração de calor. Por exemplo, na Alemanha, 74% da energia consumida é destinada a este fim [Lauterbach et al., 2012], e na China de 50% a 70% [Jia et al., 2018].

Alguns estudos avaliaram também a demanda de calor a determinadas temperaturas. Para o continente europeu, é estimado que 30% do consumo industrial seja destinado à geração de calor a temperaturas de até 100 °C [Kylili et al., 2018]. Já para a Índia, 20% do combustível consumido pelo setor tem como finalidade atender demandas de calor cujas temperaturas são de até 250 °C [Suresh e Rao, 2017]. Já em escala global, Sharma et al. [2017b] afirmam que 60% da energia térmica consumida pelas indústrias sejam destinadas à geração de calor no intervalo de 30 °C a 250 °C.

Diversos estudos acerca do potencial de uso de energia solar em processos industriais (*Solar Heat for Industrial Processes – SHIP*) foram realizados em diferentes países, como Alemanha [Lauterbach et al., 2012], Índia [Suresh e Rao, 2017], Austrália [Farjana et al., 2018b] e China [Jia et al., 2018]. Porém, nenhum estudo semelhante foi desenvolvido para o Brasil. Autores ainda salientam que, para incentivar a adoção de energia solar térmica por indústrias, são necessárias informações confiáveis sobre o potencial solar no país, bem como a existência de nichos para *test runs* e a expectativa de mitigação de emissões [Sharma et al., 2017b], aumentando assim a importância de estudos dessa natureza.

Desta forma, o presente estudo avaliou a possibilidade do uso de SAS por determinados setores industriais. Esses foram definidos com base em sua demanda de calor, obtida através de revisão bibliográfica, e pela disponibilidade de estudos similares aplicados a outros países.

Assim, o objetivo geral deste trabalho foi avaliar a viabilidade da adoção de SHIP por empresas de setores selecionados. Para isso, foram comparadas suas demandas térmicas com a faixa de operação dos coletores disponíveis no mercado. Já os objetivos específicos consistiram em uma análise de potencial, com base nos dados climáticos das localidades com indústrias instaladas, bem como o impacto econômico das mesmas. Foram observados os valores de irradiação normal direta e de irradiação global horizontal. De posse desses dados, foram sugeridas localidades que mais se beneficiariam pela adoção de SHIP.

1.1 Revisão Bibliográfica

A maior parte dos processos industriais requer o aquecimento de uma corrente de fluido e a manutenção de sua temperatura em algum tipo de reservatório. Sistemas de aquecimento existentes para calor de processo em indústrias são baseados em vapor d'água, ou água quente, vinda de uma caldeira. Para seu funcionamento, a caldeira utiliza combustíveis fósseis como carvão, gás e óleo. Ou ainda, eletricidade, a qual pode ser gerada através de diversas fontes, tanto renováveis como não-renováveis. Um sistema que utilize SHIP (*Solar Heat for Industrial Processes*) pode suprir 20% desta demanda de calor, tendo como fator limitante, usualmente, a área disponível para sua instalação [Kempener et al., 2015].

Sharma et al., 2017b, apresentaram uma revisão sobre estudos acerca do potencial de utilização de energia solar térmica em indústrias ao redor do mundo. Esses estudos foram quantitativos. Entretanto, os autores observam que não havia um consenso na metodologia utilizada para esta quantização. Dentre as diferenças apontadas entre as metodologias adotadas, destaca-se o uso de fatores de correção na demanda, justificado por fatores como a intermitência da irradiação solar, por exemplo. Alguns estudos também utilizaram correções levando em conta a possibilidade do atendimento de parte da demanda de calor através de sistemas de recuperação de calor.

O potencial de utilização de energia solar térmica na Austrália foi avaliado através de comparações com países nos quais existe o maior número de plantas em operação [Farjana et al., 2018b]. Os autores, inicialmente, identificaram os países com o maior número de sistemas SHIP, sua capacidade térmica e sua área instalada. Nesta etapa, destacaram-se a Índia, a Áustria,

a Alemanha, os Estados Unidos, a Espanha, a China, a África do Sul, o México, a França e a Grécia. Num segundo momento, para cada país identificado, os autores listaram os setores que adotaram o uso de SHIP, com destaque para os setores agrícola, de alimentos, de bebidas e têxtil. Adicionalmente, foram realizadas comparações, entre a Austrália e os países avaliados, com relação à irradiação total média anual e com o impacto desses setores no produto interno bruto de seu respectivo país.

Suresh e Rao, 2017, fizeram uma avaliação semelhante na Índia. Nesse caso, os autores identificaram, inicialmente, os processos em setores industriais de interesse. A temperatura de operação requerida por estes processos se torna, então, um critério na seleção do coletor mais apropriado. Adicionalmente, o total de energia térmica requerida por cada indústria foi estimado com base na produção anual, e com este valor estimaram a área de coletores necessária para satisfazer a demanda.

Jia et al., 2018, realizaram um estudo similar para a China. Nesse país, a utilização de SHIP começou em 2010, na indústria têxtil, expandindo-se para aplicações nos setores de tabaco, alimentos, têxtil e química. Para o setor do tabaco, três instalações foram avaliadas. A primeira utilizava coletores de placa plana para pré-aquecimento de água de caldeira. A segunda consistia em um arranjo de coletores de tubo evacuado para aquecimento direto de água de processo. A terceira utilizava pré-aquecimento de ar para secagem de tabaco, combinando coletores do tipo parabólico composto com três tanques, que armazenam a água aquecida excedente.

O estado de conservação e de funcionamento de dez diferentes instalações de coletores solares em indústrias na Grécia foi avaliado [Karagiorgas et al., 2001]. O ano de início de operação varia entre 1993 e 2000, e todas utilizam coletores de placa plana. Foram realizadas instalações nos setores têxtil, químico, de bebidas e de laticínios. Quanto ao uso, seis delas eram utilizadas como pré-aquecimento de água de caldeira, enquanto as demais abasteciam um ou mais processos específicos. Todos os processos se encontravam em operação durante o estudo, com exceção de dois que, devido à falta de recursos para manutenção, foram desativados.

No trabalho desenvolvido por Lauterbach et al., 2012, foi avaliado o potencial de utilização de energia solar térmica na indústria alemã. Um dos objetivos era contribuir para o aumento do uso de fontes renováveis na geração de calor, principal aplicação da energia na Alemanha. Para isso, os autores avaliaram o consumo de calor para diferentes setores industriais, visando identificar os mais promissores, que foram aqueles com temperatura de operação abaixo dos 300 °C. Nesse sentido, destacaram-se os seguintes setores: têxtil, de borracha e plástico, de papel, químicos, de bebidas e de alimentos.

Os setores químicos e de alimentos têm o maior potencial. Contudo, a indústria química, por trabalhar com processos com temperaturas mais elevadas, apresenta ainda a possibilidade de recuperação de calor de outros processos, devendo-se utilizar esta possibilidade antes da adoção de sistemas SHIP. Adicionalmente, os autores avaliaram, dentre os setores identificados, os processos passíveis de integração com sistemas de aquecimento solar. São exemplos desses processos o pré-aquecimento de água de caldeira, ou geração paralela de vapor, além de aquecimento direto de água para limpeza, comum aos diversos setores avaliados.

Estudos realizados para o Brasil trazem estudos de caso, como o trabalho desenvolvido por Almeida, 2018, que abordou o uso de coletores Fresnel para geração de vapor em um abatedouro. Desta forma, não há ainda um estudo que apresente, de forma abrangente, oportunidades para o uso de SHIP em diferentes setores da indústria brasileira.

1.2 Questão foco

Qual o potencial de utilização de energia solar térmica nas indústrias brasileiras?

Para responder esta questão, foram avaliados diferentes parâmetros do setor industrial brasileiro. Cita-se, como exemplo, os indicadores econômicos, a demanda de calor e de combustíveis utilizados, os tipos de coletores disponíveis no mercado e sua utilização em indústrias ao redor do mundo, e a disponibilidade do recurso solar e a irradiação média anual em localidades com elevada concentração de indústrias.

1.3 Organização do trabalho

Este primeiro Capítulo apresenta a introdução, destacando a motivação a justificativa e a delimitação da pesquisa. O segundo Capítulo desta dissertação apresenta a revisão bibliográfica acerca do uso de coletores solares no setor industrial. Aborda desde os tipos de coletores existentes no mercado até estudos que propuseram, ou que acompanharam, a implementação destes sistemas em determinados setores.

No terceiro Capítulo é apresentada a metodologia utilizada. Os indicadores avaliados, e a ordem de investigação dos mesmos, são detalhados. No quarto Capítulo, os resultados são apresentados e discutidos. No quinto capítulo são apresentadas as conclusões finais e sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este Capítulo está dividido em duas partes. O primeiro Subcapítulo traz uma revisão sobre coletores solares, destacando os tipos comumente usados em aplicações industriais. O segundo, aborda a utilização de energia solar térmica para processos industriais (*Solar Heat for Industrial Processes*, SHIP). Esta sigla é utilizada para fazer referência à utilização de coletores solares térmicos em aplicações envolvendo um ou mais processos industriais.

Ainda neste segundo Subcapítulo é realizada uma revisão direcionada a alguns setores de interesse. Estes setores foram selecionados, principalmente, por sua demanda térmica, ou seja, quanto de seu consumo energético é destinado à geração de calor. Mesmo que a maior parte dos processos industriais requeira grandes quantidades de calor [Baniassadi et al., 2018], o que a primeira vista possa demonstrar um potencial de aplicação de SHIP, a possibilidade da adoção de sistemas de recuperação de calor inviabiliza sua adoção, em alguns setores. Desta forma, setores como metais e produtos minerais, ainda que grandes consumidores de energia [Lauterbach et al., 2012], não foram considerados. Assim, a partir da revisão bibliográfica realizada, os seguintes setores foram selecionados: alimentos, papel, químicos e têxtil. Essa seleção baseou-se, principalmente, em estudos que apontam a viabilidade do uso de SHIP nos mesmos [Farjana et al., 2018a; Sharma et al., 2017b].

2.1 Coletores solares

Um coletor solar é um tipo especial de trocador de calor, que transforma radiação solar em calor [Duffie e Beckman, 2013]. Os coletores solares são classificados em dois grupos: os estacionários, também chamados de não concentradores, nos quais a área que intercepta a radiação é a mesma que a absorve; e os concentradores, que focam a radiação direta em uma área menor [Kalogirou, 2014]. Os principais coletores do tipo estacionário são o coletor de placa plana (*flat plate collector* – FPC), o coletor parabólico composto (*compound parabolic collector* – CPC), e o coletor de tubo evacuado (*evacuated tube collector* – ETC).

Os coletores FPC são o tipo mais utilizado em aplicações de baixa temperatura [Khan et al., 2018]. Este fato é atribuído à sua simplicidade de construção e ao seu baixo custo [Sabiha et al., 2015]. Ainda que diversos avanços tenham sido alcançados no design deste tipo de coletor, a fim de aumentar sua eficiência [Pandey e Chaurasiya, 2017], estes consistem, basicamente, nos seguintes componentes: uma placa absorvedora, que possui um revestimento

seletivo; uma cobertura transparente, para reduzir perdas por convecção a partir da placa absorvedora; um fluido de transporte, para remover calor da placa absorvedora; um isolante que reduza perdas de calor do coletor; e uma proteção.

Um coletor de tubos evacuados consiste em um arranjo com diversos tubos em paralelo. Cada um destes tubos é formado por um tubo interno, coberto por um revestimento seletivo, e um externo, que é transparente. O tubo interno é aquecido pela radiação solar que atravessa o tubo externo. Entre os tubos é formado vácuo, a fim de evitar perdas de calor por convecção. Ambos são conectados apenas por sua extremidade superior. Seu formato cilíndrico permite um rastreamento passivo do Sol, dando aos coletores ETC uma vantagem sobre os coletores FPC [Sabiha et al., 2015].

Dentre as diferentes formas construtivas dos ETC, as principais são o ETC com tubo de calor, e o ETC de tubo molhado [Shukla et al., 2013]. O sistema de tubo de calor utiliza uma vareta metálica, no interior do segundo tubo, por onde escoam um fluido que muda de fase na parte superior da mesma. A transferência de calor se dá com alta eficiência. Esse sistema serve como limitante, também, protegendo o sistema contra congelamento e superaquecimento. Já no sistema de tubo molhado, a água escoam diretamente, dentro do tubo interno do coletor, o qual opera como um termossifão [Kalogirou, 2014].

Coletores parabólicos compostos, CPC, consistem em uma calha com duas seções de uma parábola [Kalogirou, 2014]. São concentradores do tipo não formadores de imagem, que refletem a maior parte da radiação incidente em um absorvedor. Esse absorvedor pode ser do tipo folha, com tubos, ou tubular. O último é o tipo o mais frequente [Shukla et al., 2013], utilizando inclusive tubos evacuados para atingir temperaturas acima de 100 °C [Bellos et al., 2016]. Os coletores CPC atingem eficiências equivalentes a 50%, quando utilizam tubos evacuados como receptor de calor [Devanarayanan e Kalidasa Murugavel, 2014]. Os mesmos também podem utilizar sistemas de rastreamento, o que eleva sua eficiência em aproximadamente 14%. Entretanto, as partes móveis encarecem o sistema. Desta forma, não é recomendado para baixas taxas de concentração [Bellos et al., 2016].

Kalogirou, 2014, define os coletores concentradores como aqueles que concentram a energia solar através de lentes ou espelhos, antes de transferi-la como calor. Eles são capazes de atingir temperaturas mais elevadas que um FPC, com a mesma área de coletor, uma vez que a área que intercepta a radiação solar é maior. Por operarem principalmente com a radiação direta, necessitam de um sistema de rastreamento, podendo este ser em um ou em dois eixos.

Dentre os coletores com rastreamento em um eixo destacam-se os coletores parabólicos em calha (*Parabolic Trough Collector* – PTC), coletor de calha cilíndrica (*Cylindrical Trough Collector* – CTC), refletor linear Fresnel (*Linear Fresnel Reflector* – LFR) e coletor parabólico composto (*Compound Parabolic Collector* – CPC). Já os sistemas de rastreamento em dois eixos consistem em refletores de disco parabólico (*Parabolic Dish Reflector* – PDR) e coletores de campo heliostático (*Heliostatic Field Collector* – HFC).

O coletor PTC, pode ser descrito como um longo refletor em formato de calha com seção parabólica [Hafez et al., 2018]. Ele é composto por um absorvedor, através do qual o fluido circula, um tubo transparente concêntrico ao absorvedor, utilizado para reduzir perdas de calor por convecção, e o refletor parabólico. O refletor é montado em uma estrutura sólida, que rastreia o movimento do Sol, e o absorvedor é fixado na linha focal da parábola refletora [Jebasingh e Herbert, 2016]. A necessidade de partes móveis na seção de troca de calor é a maior desvantagem deste tipo de coletor, por elevar o custo de manutenção do mesmo [Hafez et al., 2018].

O coletor LFR consiste em um arranjo de espelhos, levemente espaçados, que rotacionam em seu eixo longitudinal a fim de rastrear o Sol, concentrando a radiação em um absorvedor tubular [Buscemi et al., 2018]. Ele pode ser imaginado como um coletor PTC “quebrado”, no qual os refletores não necessitam do formato parabólico [Kalogirou, 2014]. Esse efeito é semelhante ao princípio de funcionamento das lentes de Fresnel, por isso o nome. Ainda segundo Kalogirou, 2014, as principais vantagens dos coletores LFR são o uso de espelhos planos, que são mais baratos, e a possibilidade de esses serem montados no chão, reduzindo os requisitos estruturais. Como apenas os refletores são móveis, é possível o uso de absorvedores maiores, ou, para arranjos compactos, o uso de mais de um absorvedor, com o mesmo refletor sendo direcionado para diferentes absorvedores no decorrer do dia.

Um coletor PDR é um coletor de ponto focal que rastreia o Sol em dois eixos, concentrando a energia solar em um absorvedor localizado no ponto focal do disco [Kalogirou, 2014]. Esse disco é composto por espelhos fixados em uma estrutura, os quais podem ser planos. Dentre os modelos desse coletor, destacam-se o *Scheffler dish* e o *Arun-160 dish*, utilizados, principalmente, por indústrias na Índia [Kempener et al., 2015].

Um resumo dos principais coletores solares disponíveis no mercado [Kalogirou, 2014], é apresentado na Tabela 2.1. Algumas de suas principais características também são

apresentadas, como o tipo de rastreamento e de absorvedor, a razão de concentração, RC, e seu intervalo de temperatura de operação, ΔT_{op} .

Tabela 2.1– Principais características dos coletores solares mais utilizados em processos de aquecimento na indústria.[Traduzido de Kalogirou, 2014]

Rastreamento	Coletor	Absorvedor	RC	ΔT_{op} [°C]
Estacionário	Coletor de Placa Plana (FPC)	Plano	1	30 - 80
	Coletor de Tubo Evacuado (ETC)	Plano	1	50 - 200
	Coletor Parabólico Composto (CPC)	Tubular	1 - 5	60 - 240
Eixo único	Coletor Parabólico Composto (CPC)	Tubular	5 - 15	60 - 300
	Refletor Linear Fresnel (LFR)	Tubular	10 - 40	60 - 250
	Coletor Parabólico em Calha (PTC)	Tubular	15 - 45	60 - 300
	Coletor de Calha Cilíndrica (CTC)	Tubular	10 - 50	60 - 300
Eixo duplo	Refletor em Disco Parabólico (PDR)	Pontual	100 - 1000	100 - 500
	Coletor de Campo Heliostático (HFC)	Pontual	100 - 1500	150 - 2000

2.2 Solar Heat for Industrial Processes (SHIP)

A integração de sistemas de aquecimento solar, SAS, com sistemas industriais já existentes, para a geração de vapor d'água e água quente, é objeto de interesse para indústrias e governos, podendo ser vista como um importante passo em direção à sustentabilidade [Walmsley et al., 2015]. Uma revisão dos principais processos atendidos por SAS, em diversos países, foi realizada por Farjana et al., 2018a. Nesse estudo, os autores também destacaram o número de instalações que utilizam a integração para fins de lavagem, pré-aquecimento de água, e de secagem.

Visando ampliar o uso de SAS nas indústrias, a *International Energy Agency*, IEA, através de dois projetos denominados *Tasks*, abordou diferentes formas de integração de SAS em processos industriais. A chamada *Task 33 – Solar Heat for Industrial Process* tinha como objetivo identificar o potencial do uso de SAS em aplicações industriais e servir como uma ferramenta de referência à promoção da energia solar nesse setor [Tobergte e Curtis, 2013]. Por outro lado, a *Task 49 – Solar Heat Integration in Industrial Processes* abordou as possibilidades de integração de SAS com sistemas de aquecimento já instalados [Horta et al., 2016]. Um dos resultados desse estudo foi um banco de dados de instalações existentes, onde é possível

consultar a forma de integração e o tipo de coletor utilizado em diversos setores industriais [IEA, 2018].

Diversos estudos [Farjana et al., 2018a; Kalogirou, 2014; Sharma et al., 2017b] listaram processos que utilizam calor, em temperaturas baixas e médias. Ou seja, com potencial à utilização de SHIP. Os principais processos apresentados nesses estudos, bem como suas respectivas faixas de temperatura de operação, ΔT_{op} , são listados na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Faixas de temperatura de diversos processos industriais. [Adaptado de Farjana et al., 2018a; Kalogirou, 2014; Sharma et al., 2017b]

Indústria	Processo	ΔT_{op} [°C]
Laticínios	Pressurização	60 - 80
	Esterilização	100 - 120
	Secagem	120 - 180
	Concentração	60 - 80
Alimentos Enlatados	Esterilização	110 - 120
	Pasteurização	60 - 80
	Cozimento	60 - 90
	Branqueamento	60 - 90
Têxtil	Branqueamento, tingimento	60 - 90
	Secagem, desengorduramento	100 - 130
	Estampagem	80 - 100
	Acabamento	160 - 180
Papel	Cozimento, secagem	60 - 80
	Branqueamento	130 - 150
Químicos	Borracha sintética	150 - 200
	Destilação	100 - 200
	Evaporação	110 - 170
	Secagem	120 - 170
	Espessamento	130 - 140
Carne	Lavagem, esterilização	60 - 90
	Cozimento	90 - 100
Bebidas	Lavagem, esterilização	60 - 80
	Pasteurização	60 - 70

Tabela 2.2 – Faixas de temperatura de diversos processos industriais (continuação).
[Adaptado de Farjana et al., 2018a, Kalogirou, 2014 e Sharma et al., 2017b]

Indústria	Processo	ΔT_{op} [°C]
Derivados de Madeira	Secagem	60 - 100
	Preparação da massa	120 - 170
Cerâmicos	Cura	60 -140
Automobilístico	Tratamento pré pintura	40 - 50
	Preparo da tinta	175 - 225
	Secagem de pintura	150 - 175
Todos os setores	pré-aquecimento (caldeira)	30 - 100
	Climatização	55 - 180

Conforme se observa na Tabela 2.2, vários processos demandam uma quantidade significativa de energia térmica, o que faz do setor industrial uma opção promissora para a utilização de SAS. Dependendo da temperatura de operação, diferentes tipos de coletores podem ser utilizados. Isto é, desde coletores do tipo placa plana e tubo evacuado (para temperaturas de até 100 °C) até coletores concentradores, como disco parabólico, linear Fresnel e coletor parabólico em calha (para temperaturas entre 100 °C e 400 °C) [Weiss e Spörk-Dür, 2017].

Também pode se observar que a limpeza, com baixa temperatura de operação, é uma etapa obrigatória em diversos processos industriais, sendo um grande consumidor de energia em setores como de alimentos [Jia et al., 2018]. Por suas características, é uma aplicação promissora para o uso de SAS. Por outro lado, autores apontam que o pré-aquecimento de água de caldeira é a opção ideal de integração inicial com SAS, haja vista sua baixa complexidade e baixo custo inicial, além de aplicabilidade em diversos setores [Farjana et al., 2018a].

Nos subcapítulos seguintes apresenta-se a revisão bibliográfica para cada setor industrial selecionado.

2.2.1 Indústria química

Expósito et al., 2016, apontaram a necessidade de um tratamento efetivo para a remoção de compostos orgânicos em águas residuais de processos industriais. Isto se dá, principalmente, em indústrias do setor químico, como na produção de defensivos agrícolas e produtos

farmacêuticos. Assim, os autores avaliaram a possibilidade do uso de fotodegradação assistida por SAS, fazendo uso de coletores CPC. Água residual proveniente de uma indústria farmacêutica foi sujeitada ao tratamento, apresentando uma redução de 79% no índice de carbono orgânico total em duas horas de tratamento.

Almomani et al., 2018, avaliaram a utilização de SAS no tratamento de água contaminada por processos farmacêuticos. O estudo avaliou métodos de tratamento de água contaminada com produtos farmacêuticos de quatro grupos distintos, utilizando quatro tratamentos distintos para as águas residuais. Os resultados obtidos a partir desses processos foram comparados ao desempenho dos mesmos processos quando assistidos por SAS, os quais utilizavam coletores CPC. Quando o SAS foi utilizado em conjunto com os tratamentos convencionais, foram atingidas taxas de degradação de até 98%, mostrando o potencial do uso desta tecnologia na remoção de materiais tóxicos e não biodegradáveis. Contudo, o tratamento utilizando somente SAS não obteve bons resultados.

Um estudo avaliou a possibilidade de utilização de SAS por uma indústria, do setor, na Jordânia [Haagen et al., 2015]. O setor avaliado foi selecionado por contribuir com 20% do PIB industrial do país, além do fato das indústrias farmacêuticas, usualmente, possuírem uma central de vapor que abastece todos os processos, operando entre 160 °C e 180 °C. Ainda segundo os autores, outro fator que incentivou o estudo foi o corte no subsídio da energia pelo governo. Com isso, o setor perdeu competitividade na região. Foram instalados, então, dezoito coletores do tipo linear Fresnel, conectados em série. A água circula pelos coletores, resultando em uma mistura de água e vapor, e é armazenada em um reservatório. Neste reservatório é realizada a separação, sendo o vapor armazenado e enviado para uso nos processos da indústria e a água enviada para recircular pelos coletores. Os autores estimam que essa instalação trará para a empresa uma economia anual de, aproximadamente, trinta mil litros de óleo diesel.

Visto que a instalação anteriormente citada é a primeira indústria da região a utilizar geração direta de vapor, seu primeiro ano de operação foi acompanhado, gerando um novo estudo [Berger et al., 2016]. Assim, foi observado que durante o verão e o outono, a caldeira não foi utilizada ao longo do dia, entrando em operação apenas ao anoitecer. Devido ao uso do reservatório, foi obtida estabilidade na operação do sistema. O monitoramento realizado pelos autores mostrou que, no início da produção, às 6 horas da manhã, o sistema ainda não conseguia abastecer os processos, sendo necessário o uso da caldeira à diesel. Entretanto, por volta de 08h 20min, a pressão de vapor no reservatório era suficiente para o início do uso do vapor

gerado pelo SAS. Ao longo do dia, o reservatório compensava as flutuações no consumo, até por volta das 17 horas, quando o SAS não gerava mais vapor suficiente.

Novas instrumentações foram instaladas na planta, além da instalação de um sistema em paralelo ao reservatório de vapor, visando solucionar problemas com condensados no início da operação e momentos de céu nublado. Essas alterações geraram uma nova publicação, que avaliou a operação em dois períodos distintos, de duas semanas cada, um no inverno e um no verão [Frein et al., 2018]. Neste estudo, também foi simulado o ganho de calor, quedas de pressão nos coletores e no reservatório, além dos níveis de água e de combustível. Os valores obtidos nas simulações foram comparados aos valores medidos pelo novo sistema de instrumentação. Para os dois períodos avaliados, os resultados simulados se aproximaram dos resultados experimentais, quando o conjunto de espelhos era limpo frequentemente. Os autores destacaram o efeito da limpeza dos espelhos. Ou seja, num período em que os espelhos ficaram 33 dias sem limpeza, o rendimento do sistema foi 40% inferior ao estimado pelas simulações. Adicionalmente, foram propostas quatro sugestões de melhorias, visando solucionar uma perda de carga excessiva, ocasionada por vapor nas tubulações. Esta falha ocorria nos momentos de início e de término de operações. Foram propostas as seguintes soluções: otimização no sistema de controle, aumento no diâmetro da tubulação, e uso de um sifão, ou aumento na vazão de água, no momento do desligamento. Essas mudanças objetivavam uma redução no desgaste dos componentes, além do aumento do controle sobre a saída de vapor.

2.2.2 Indústria têxtil

Na indústria têxtil é necessário um suprimento contínuo de água, principalmente no processo de tingimento [Farjana et al., 2018a]. Nesse processo, a água pode ser utilizada em temperaturas de até 80 °C. Devido a esta demanda, a utilização de SAS no setor, para fins de pré-aquecimento de água, é considerada promissora. Pode-se observar isto também nas instalações já existentes, onde a aplicação mais frequente de SHIP no setor se dá neste formato [IEA, 2018].

Pirasteh et al., 2014, realizaram um estudo de revisão acerca da aplicação de SAS em processos de secagem para diferentes setores. Quando avaliaram o setor têxtil, os autores apontaram que, devido ao uso de grandes quantidades de água na preparação dos produtos, a secagem tem um papel importante no processo, e também no consumo de energia térmica. Segundo valores médios de indústrias do Japão, 17,2% da energia térmica consumida por indústrias desse setor destina-se à secagem dos produtos. Segundo os autores, também, esse

setor apresenta uma manufatura complexa. Desta forma, os diferentes métodos de produção e de acabamento utilizados (incluindo preparação, tingimento, acabamentos químico e mecânico, e revestimento) dificultam o desenvolvimento de aplicações específicas que sejam facilmente reproduzidas por outras indústrias do setor.

Hasanbeigi e Price, 2012, estudaram os usos da energia na indústria têxtil, destacando os processos comuns às indústrias do setor, e o tipo de energia utilizada. No uso da energia térmica destacam-se os processos de preparação, tingimento, impressão e acabamento, denominados “processos molhados”. Esses processos utilizam energia térmica na forma de calor, ou na forma de vapor d’água. O estudo ainda identificou oportunidades de melhoria no setor, todas focadas em sistemas de recuperação de calor e medidas para melhorar a eficiência energética.

A produção especializada desse setor foi objeto de estudo de Martínez, 2010, no qual foram avaliados os padrões de consumo de energia, e a eficiência energética de duas indústrias do setor. Uma estava localizada em um país desenvolvido, Alemanha, e outra em um país em desenvolvimento, Colômbia. Esses países foram selecionados devido ao fato de serem dois dos maiores exportadores do setor. O artigo apresentava os principais processos em uma indústria do setor têxtil, diferenciando consumos de energia elétrica e energia térmica. Para fins comparativos entre os países, foram utilizados os seguintes índices: intensidade energética em termos monetários, emissões de CO₂ e intensidade energética baseada em produção. Com os resultados obtidos, a autora aponta que melhorias no setor, na Alemanha, podem ser alcançadas através de investimentos em energia. Para a Colômbia, ainda há a possibilidade de aplicação de novas tecnologias.

Em 1994, a China tornou-se o maior produtor e exportador de produtos de vestuário, tornando a indústria têxtil fundamental para a manutenção do equilíbrio da balança comercial do país [Jia et al., 2018]. Assim, os autores avaliaram o desempenho de duas instalações de SAS neste setor. A primeira utilizava 8.583 m² de coletores de tubo evacuado, com dois tanques de armazenamento de 150.000 l de apoio, e uma fonte auxiliar de calor. Esse sistema foi capaz de fornecer água a 60 °C para o setor de tingimento, com frações solares de aproximadamente 60% e um retorno do investimento em apenas 2,75 anos.

A segunda instalação também possuía coletores de tubo evacuado, com área de 7.460 m², conectados a dois tanques de armazenamento, um de 150.000 l destinado ao armazenamento de calor, e um de 350.000 l mantido à temperatura constante. Essa instalação

obteve uma fração solar de 60%, com uma vida útil do sistema estimada em 12 anos, e um retorno de investimento de 6 anos.

A Turquia é o terceiro maior produtor têxtil, em produção per capita, do mundo. Por outro lado, o país importa 50% da energia utilizada. Com isso, de 40 a 50% dos ganhos com exportações são gastos importando combustíveis, principalmente óleo e gás natural [Muneer et al., 2008]. O setor têxtil tem grande importância econômica para o país, sendo responsável por 11% do PIB industrial. Assim, os autores listaram diversas vantagens na adoção de SHIP tanto para o setor quanto para o país. Destaca-se, por exemplo, a alta irradiação solar incidente, a existência de empresas que produzem coletores solares no país, a redução da dependência de importação de combustíveis, e a redução de emissões de CO₂.

Os autores também citaram as principais barreiras à adoção de SHIP pelas indústrias, como as altas taxas de juros, que dificultam investimentos em novas tecnologias, por exemplo. Foi avaliado, também, o tempo de retorno, e a fração solar, de uma instalação. O sistema analisado consistia em dois conjuntos de coletores ETC com armazenamento integrado, para atender as demandas de 500 toneladas de água a 40 °C e de 200 toneladas de água a 80 °C. Esses valores foram selecionados por serem o consumo típico de uma fábrica de algodão de médio porte. Simulações, para estas demandas, apresentaram frações solares de 60% e de 51%, respectivamente.

O uso de SHIP no setor têxtil também foi avaliado para a Tunísia [Calderoni et al., 2012]. O setor tem grande relevância para o país, contemplando quase metade das indústrias instaladas. Nesse sentido, foi avaliada a demanda térmica de três indústrias. A primeira utilizava aquecimento de água para tingimento, com temperaturas inferiores a 100 °C. A segunda utilizava calor na forma de vapor a 180 °C, principalmente para passar a ferro as roupas produzidas, com uma menor parcela de calor sendo dedicada aos processos de lavagem e de secagem. Na terceira indústria avaliada, os principais processos realizados eram lavagem, utilizando temperaturas entre 50 °C e 70 °C, e secagem, também utilizando linhas de vapor.

Para a primeira indústria avaliada, foi sugerido um arranjo de coletores de tubo evacuado, enquanto para a segunda, e a terceira indústria, foram sugeridos coletores com concentração do tipo PTC, devido à temperatura mais elevada. Cabe salientar que, embora o processo de lavagem, presente na segunda e terceira indústria, não necessite de temperaturas elevadas, os autores optaram por coletores com concentração para geração de vapor, visto que para o processo de secagem esta é a solução mais prática. Adicionalmente, o uso de SAS para

a geração de vapor possibilita utilizar as redes de vapor já existentes nas instalações, simplificando os projetos. Entretanto, devido ao subsídio ao gás natural, o *payback* de todas as instalações foi superior a vinte anos. Desta forma, os autores consideraram, então, para cálculo de *payback*, o valor do subsídio do governo, que arca com metade do custo do gás natural consumido pela indústria. Com esta consideração, alguns cenários se mostraram promissores ao uso de SHIP.

Outro estudo, no mesmo país [Frein et al., 2014], apresentou as principais análises e passos do projeto de uma planta experimental de SHIP, consistindo em um campo de coletores de placa plana de aproximadamente 1.000 m². Esse sistema, com o auxílio de um tanque de armazenamento e estabilização, abastece o setor de tingimento de uma indústria têxtil. Devido aos subsídios para o uso do gás natural pela indústria no país, a instalação não alcançaria o *payback* dentro da vida útil da mesma. Contudo, essa instalação foi subsidiada, a fim de se tornar um exemplo de integração de SHIP no setor.

2.2.3 Indústria do papel e celulose

Na indústria do papel, estima-se que 75% da energia consumida seja destinada a calor de processo a temperaturas baixas e médias [Farjana et al., 2018a]. Essa demanda por si só demonstraria um grande potencial de utilização de SHIP pelo setor. Entretanto, a produção de papel, com base em celulose, gera um subproduto chamado lixívia. Esse subproduto é aproveitado para queima, como combustível. Desta forma, a adoção de SHIP se torna atrativa, principalmente, em plantas que operam com reciclagem de fibras, tendo em vista que as mesmas não geram esse subproduto.

De acordo com estudo realizado por [Sharma et al., 2015], 47% da produção de papel na Índia utilizam fibras recicladas como matéria prima. Assim, os autores avaliaram o potencial de uso de SAS na indústria do papel nesse país. O país é responsável por, em média, 2,6% da produção mundial de papel, e tem um consumo per capita seis vezes menor do que a média mundial, o qual é de 58 kg/pessoa. Desta forma, ainda que a produção e consumo de papel na Índia não sejam expressivos no cenário mundial, a predominância do uso de combustíveis fósseis na sua produção, onde o carvão e o petróleo compõem 68% do consumo final de energia pelo setor, motivou este estudo inicial sobre a aplicabilidade de SHIP. Assim, os autores estimaram a demanda de calor nas indústrias do setor, em cada estado do país, com base na produção anual divulgada. Nesse estudo foi dada ênfase em indústrias de pequeno e médio porte, que utilizam fibras recicladas como matéria prima. Assim, foi avaliada a possibilidade

de integração de cinco tipos de coletores distintos, FPC, ETC, PTC, CPC e *Arun Dish*. Foram apresentadas sugestões de uso para os coletores, de acordo com seu intervalo de temperatura de operação e com a temperatura requisitada por processos típicos do setor.

Os mesmo autores [Sharma et al., 2016] realizaram um estudo mais aprofundado do setor no mesmo país. Neste, foi avaliado o processo produtivo de papel a partir de três matérias primas distintas: madeira, resíduos agrícolas e fibras recicladas. Ao determinar as etapas do processo produtivo, os autores destacaram os pontos de utilização de energia térmica em um típico processo produtivo de papel. Com base nesta demanda de calor, foi selecionado o coletor do tipo PTC para a geração de vapor integrado a cada uma das fábricas avaliadas. Assim, os autores obtiveram frações solares de até 30%, desconsiderando as plantas que utilizam madeira como matéria prima, devido à possibilidade da queima de lixívia. Adicionalmente, os autores também estimaram a redução nas emissões de carbono, no caso de as indústrias adotarem o sistema.

2.2.4 Indústria alimentícia

Os processos usualmente utilizados pelo setor alimentício demandam grandes quantidades de calor de processo, sendo grande parte na faixa de temperaturas que podem ser atendidas pelo uso de SHIP [Jia et al., 2018]. Assim, os autores avaliaram dois projetos desse setor na China. O primeiro utilizava coletores de tubo evacuado, para pré-aquecimento de água de caldeira, o qual apresentou um *payback* de 4,4 anos e uma economia anual de aproximadamente 22.000 m³ de gás natural. O segundo possuía uma área de 168 m² de coletores para o pré-aquecimento de ar para secagem de frutas. Nesse caso, o consumo de energia do processo foi reduzido em 57%.

Outro estudo [Biglia et al., 2015] avaliou a ampliação de uma instalação de SAS existente, em uma indústria de chocolate. O sistema instalado contava com quatro coletores do tipo FPC, totalizando 8 m² de área, com um tanque de armazenamento de 1.500 l, e uma fração solar de 6,9%. Assim, foram realizadas simulações a fim de determinar o impacto da área de coletor solar, do volume do tanque de armazenamento, e do sistema de recuperação de calor no consumo de energia. As simulações mostraram que o sistema de recuperação de calor é financeiramente mais rentável no curto prazo, enquanto que um aumento na área dos coletores teria maior impacto na redução do consumo de energia.

Um pastifício no sul da Itália foi estudado por Buscemi et al., 2018, tendo sua demanda térmica acompanhada por dois anos. Com esses dados, foi proposto um arranjo de coletores do tipo linear Fresnel, que ocupavam uma área de 6.000 m², associado a um sistema de armazenamento de energia térmica (em concreto). As simulações mostraram que o sistema era capaz de suprir 40% da demanda térmica da fábrica.

A aplicação mais simples da energia solar no setor alimentício, e largamente utilizada, é a secagem de produtos alimentícios (frutas, ervas, sementes) ao ar livre, também chamada de secagem ao Sol [Kempener et al., 2015]. Porém, este tipo de processo expõe os produtos à contaminação, podendo, também, prejudicar seu aspecto final. Assim, diferentes estudos foram realizados avaliando parâmetros de secagem em diversos produtos, desde cenouras [Şevik, 2013], frutas, como uvas [Essalhi et al., 2018], morangos [El-Beltagy et al., 2007] e melão [Aktaş et al., 2016], e até pescados [Kituu et al., 2010].

Outro estudo abordou a secagem de diferentes produtos, porém com enfoque na dependência da uniformidade da secagem do produto final com fatores geométricos dos coletores e câmaras de secagem, bem como com uso de desumidificadores e sistemas auxiliares [Abdulmalek et al., 2018].

Uma abordagem alternativa foi apresentada ao se propor o uso da secagem solar como forma de aumentar a eficiência da queima de biomassa [Jakkampati e Mandapati, 2016]. Os autores propuseram o uso de SAS para aquecimento do ar, que seria utilizado para reduzir a umidade presente no bagaço de cana, muito utilizado para queima pela indústria açucareira.

2.2.4.1 Indústria alimentícia: laticínios

O potencial do subsetor de laticínios para a aplicação de SHIP é apontado por diversos estudos [Allouhi et al., 2017; Horta et al., 2016; Kempener et al., 2015; Müller et al., 2014]. Dentre as razões apontadas para esse potencial, tem-se o fato de que a produção se mantém constante em todos os dias da semana [Mekhilef et al., 2011]. Essa característica, de produção contínua, contribui para acelerar o retorno do investimento. Outro fator apontado é que a maior parte da demanda térmica do setor se dá abaixo dos 100 °C [Müller et al., 2014], sendo principalmente utilizada nos processos de pasteurização e esterilização, e na secagem, para a produção de leite em pó.

Um estudo propôs a instalação de coletores solares para uma fábrica de leite em pó na Nova Zelândia [Atkins et al., 2010]. Foi sugerido um arranjo de 1.000 m² de coletores de tubo evacuado. Esse SAS atingiu uma fração solar anual de 14,4%. Com relação a essa fração, é importante salientar que, segundo os autores, a área de coleção é consideravelmente pequena para a demanda da fábrica, e que a avaliação foi feita ao longo de nove meses, o equivalente a 6.576 horas. Ainda segundo os autores, esse processo se mostrou promissor por ter sua produção interrompida no inverno, devido à redução na produção de leite. Dessa forma, o sistema não é utilizado nos meses de menor irradiação.

Diversas indústrias do setor, porém, não apresentam parada em sua produção. Isso ocorre devido às condições climáticas de onde estão instaladas e à variedade de itens produzidos. Esse é o caso de uma indústria de laticínios avaliada por Pietruschka et al., 2012, localizada na Espanha. Essa indústria mantém uma produção de 4.000.000 litros mensais, ao longo do ano. Utiliza linhas de vapor, de forma a atender todas as linhas de produção (leite, leite em pó, e queijos). Assim, os autores propuseram a instalação de 2.040 m² de coletores do tipo PTC, destinados à geração de vapor. Foi estimado que essa instalação acarretaria em uma redução no consumo de gás natural de 120 mil m³ anuais.

Outro estudo para o mesmo país [Quijera et al., 2011] acompanhou o processo produtivo de laticínios, registrando horários, quantidade de produção e temperatura requerida em cada processo. Assim, o processo de pasteurização destacou-se como aquele que utiliza mais energia. Nesse processo a água da rede é aquecida em caldeiras, abastecidas com gás natural, até alcançar temperaturas que variam de 12 °C até 95 °C. O sistema proposto, atuando no pré-aquecimento da água para caldeira, obteve frações solares de aproximadamente 50%, utilizando coletores de tubo evacuado em uma área de 1.000 m².

Quatro processos distintos de uma fábrica de laticínios localizada no Marrocos foram avaliados por Allouhi et al., 2017. Nesse estudo, os autores propuseram um sistema que consistia em um arranjo de 400 m² de coletores de tubo evacuado, que abasteceriam um tanque. O tanque armazenava o calor e o distribuía conforme a demanda. Adicionalmente, trocadores de calor ajustavam a temperatura, caso necessário, na entrada de cada processo. As simulações realizadas estimaram a fração solar do sistema em 41%, com um *payback* de 12,27 anos.

Para a Índia, um estudo se concentrou na energia térmica requerida, exclusivamente, para o processo de pasteurização [Sharma et al., 2017a]. Com base na produção de leite de cada estado, e valores médios de calor necessários para o processamento do leite, os autores

apresentam um potencial para o país, estimando o fornecimento de 20% a 30% da demanda pelo uso de coletores solares com concentrador. A pasteurização também é objeto de outro estudo [Panchal et al., 2018], no qual é realizada uma revisão de métodos de pasteurização assistidos por coletores solares, a fim de determinar a viabilidade do uso de FPC para pasteurização em áreas remotas, ou seja, aquelas que não possuem acesso à eletricidade ou ao gás natural.

2.2.4.2 Indústria alimentícia: carne

Uma planta modelo foi implementada em uma fábrica de derivados de carne, na Áustria [Pietruschka et al., 2012], como parte do *InSun Project*. A instalação ocupava uma área de 1.067 m² de coletores FPC, destinados ao pré-aquecimento da água da caldeira. Foi estimado que a instalação reduziria o consumo de óleo em aproximadamente 100 mil litros por ano.

O desempenho desta instalação foi monitorado por dois anos [Pietruschka et al., 2016], obtendo frações solares entre 5%, no inverno, e 36%, no verão. A instalação existente foi ampliada, sendo adicionados 130 m² de coletores PTC em paralelo à instalação existente. Essa melhoria tinha como finalidade aumentar a temperatura de saída da água do arranjo de coletores FPC. Segundo os autores, a instalação desse segundo arranjo foi finalizada pouco antes da publicação do estudo, não havendo, então, dados sobre a nova fração solar obtida. Apesar do desempenho positivo, o tempo de retorno do investimento foi superior a dez anos. Isto se deu devido à baixa nos preços dos combustíveis ao longo do projeto. Desta forma, seriam necessários incentivos governamentais para a viabilidade de outras instalações nas regiões propostas pelos autores.

Liu et al., 2015, acompanharam o desempenho de coletores FPC, divididos em dois arranjos, em um abatedouro em Taiwan. A instalação inicialmente contava com 115 m² de área, sendo ampliada dois anos depois em mais 120 m² de coletores, para atender outro processo da fábrica. Esse estudo, então, monitorou um intervalo de três meses, a fim de avaliar a eficiência da instalação e propor melhorias para o sistema. A análise demonstrou a viabilidade do sistema, que teve o tempo de *payback* estimado em 6,5 anos, em parte por incentivos do governo que arcou com cerca de 20% dos custos do sistema.

Para outro abatedouro, desta vez localizado no Brasil, foi avaliada a viabilidade da instalação de coletores lineares Fresnel [Almeida, 2018]. A empresa, localizada no sul do país,

contava com um sistema de geração e distribuição de vapor, que atendia diversos processos. Assim, foram avaliadas três áreas de espelhos para coletores lineares Fresnel, visando produzir até 50% da carga do gerador de vapor, operando em paralelo com o mesmo. Segundo a autora, os valores de fração solar encontrados foram baixos, chegando a 7,6% para uma área instalada de aproximadamente 24.000 m². O estudo ainda obteve um custo máximo para o campo de coletores, de forma a viabilizar a instalação, para que a mesma tivesse um tempo de *payback* inferior a 12 anos. Entretanto, o valor obtido foi muito inferior aos preços praticados no mercado. Foi proposto, então, um arranjo com coletores FPC, para pré-aquecimento da água da caldeira. Essa instalação, com uma área de cerca de 3.000 m², seria capaz de economizar 1,5% do consumo de biomassa, com um *payback* estimado em 8,4 anos.

A fim de evitar os altos índices de desperdício de pescados em regiões isoladas, Kituu et al., 2010, realizaram simulações para prever o comportamento da secagem da tilápia-do-nylo (*Oreochromis niloticus*) em um secador solar. Comparações com dados experimentais validaram o modelo, mostrando a viabilidade do uso desses sistemas em regiões isoladas do Quênia. Outro estudo no setor [Quijera et al., 2014], desta vez na Espanha, avaliou o sistema de vapor existente em uma fábrica de atum enlatado, a fim de propor uma integração com coletores solares. A empresa utilizava vapor a 200 °C para todos os seus processos. Assim, um arranjo de 500 m² de coletores de tubo evacuado (ETC), para pré-aquecimento de água de caldeira, foi selecionado. A fração solar obtida pelo sistema foi de 11,5%. Porém, aliada às propostas de recuperação de calor e de eficiência energética dos autores, a economia de gás natural estimada chegava a 24%.

3 METODOLOGIA

A Figura 3.1, a seguir, mostra um fluxograma da metodologia utilizada neste trabalho. A mesma será detalhada ao longo deste Capítulo.

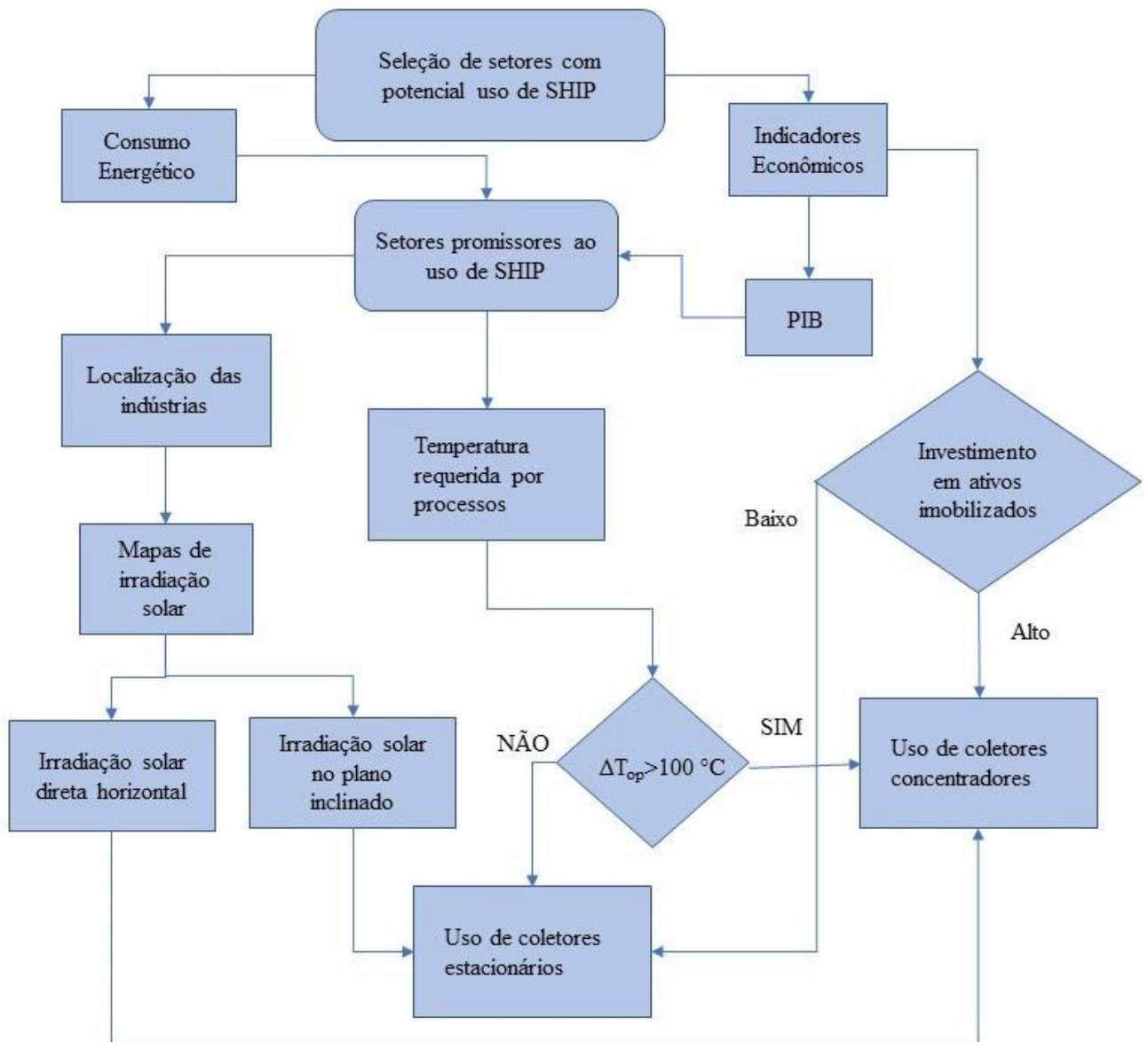


Figura 3.1 – Fluxograma da metodologia empregada.

3.1 Consumo energético

Com base nos dados disponibilizados pelo Balanço Energético Nacional 2018: Ano base 2017, BEN 2018, [EPE, 2018], foi avaliado o impacto do consumo de energia, de cada setor

selecionado, no consumo geral do parque industrial brasileiro. Também foi identificada qual a parcela do consumo de energia de cada setor de interesse que foi destinada à geração de calor. Não obstante, também foram identificados os tipos de combustíveis utilizados por cada setor.

Esta avaliação baseou-se na hipótese levantada em um estudo que afirmava que, “no que tange ao consumo de energia pelos setores industriais, todo consumo de energia que não seja na forma de eletricidade pode ser substituído, ou suplementado, por fontes de energia solar térmica, visto que estes são destinados à geração de calor” [Pereira, 2018].

3.2 Impacto econômico

A relevância de cada setor, com relação ao desenvolvimento de um “mercado solar térmico” para o uso de sistemas SHIP, depende do perfil industrial local [Tobergte e Curtis, 2013]. Os autores citam os casos da Alemanha e Áustria, onde as cervejarias destacam-se no setor industrial. Dessa forma, receberam maior enfoque nos estudos de aplicações de SAS em sistemas SHIP. As indústrias de laticínios na Grécia e na Itália, também receberam maior atenção, devido à sua significativa contribuição econômica.

Assim, para avaliar a importância de cada setor industrial selecionado, três indicadores econômicos foram avaliados. Inicialmente, os dados relativos ao produto interno bruto (PIB) de todo o setor industrial [EPE, 2018], a fim de posicionar os setores de interesse no panorama industrial nacional. Em seguida, a composição setorial do PIB industrial [CNI, 2018]. Este dado foi utilizado para aprofundar a análise do impacto da indústria, e dos setores de interesse, na economia dos estados e regiões do país.

Por fim, foram avaliados os investimentos em ativo imobilizado destes setores [IBGE, 2016]. Este dado é importante por demonstrar o histórico de investimentos das empresas na expansão e modernização de suas operações.

3.3 Sistemas SHIP instalados no mundo

Segundo Weiss et al. [2017], pelo menos 624 plantas de SHIP estavam em operação até o final de 2017. Dados da Agência Internacional de Energia [IEA, 2018] mostraram detalhadamente 283 plantas, especificando o setor de atuação da empresa, quais processos são atendidos pelo SAS, de que forma esse sistema foi integrado ao processo, e a tecnologia de coletor utilizada. De posse destes dados, foi realizado um levantamento das instalações nos

setores de interesse. Com isso, puderam determinar um padrão das instalações de SAS em operação, observando os tipos de coletor comumente utilizados por cada setor

3.4 Comparativo entre temperaturas de processo

A fim de determinar quais coletores eram mais adequados aos requisitos de cada setor, foi realizada uma avaliação comparativa entre as temperaturas requeridas pelos principais processos identificados, e a faixa de temperatura de operação dos coletores solares disponíveis no mercado.

Esta análise considerou cada processo de forma isolada, não levando em conta o uso de linhas de vapor que abasteçam todos os processos da indústria. Isto ocorreu devido um estudo afirmar que, mesmo que a indústria abasteça seus processos com calor na forma de vapor, para uma correta avaliação da viabilidade do uso de coletores solares, deve-se observar a temperatura necessária a cada processo, e não a temperatura do meio de transporte de calor [Tobergte e Curtis, 2013].

Esta abordagem, segundo os autores, além de ajudar na determinação da implementação do uso da energia solar térmica, pode trazer reduções na energia consumida pelos processos.

3.5 Disponibilidade do recurso solar

Para avaliar a disponibilidade do recurso solar onde estão instaladas as indústrias dos setores selecionados, foram utilizados dados do Atlas Brasileiro de Energia Solar [Pereira et al., 2017]. Esse atlas fornece mapas com a média anual do total diário da irradiação solar direta no plano horizontal e a média anual do total diário de irradiação solar no plano inclinado na latitude. Estes dados foram comparados com dados fornecidos pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, IBGE, [IBGE, 2015], que fornece mapas com localidades que possuam no mínimo dez indústrias de determinados setores. Com isso, foi possível determinar localidades que tenham melhor potencial para a utilização de SAS em aplicações industriais.

4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Este capítulo divide-se em dois Subcapítulos. No primeiro, os resultados de cada setor avaliado são apresentados na mesma ordem em que aparecem no Capítulo 3. Em seguida, com base nesses dados, discute-se, principalmente, quais são os principais potenciais identificados e possíveis assuntos que merecem uma análise mais detalhada em estudos futuros.

4.1 Apresentação dos resultados

Neste Subcapítulo, são apresentados os resultados obtidos para cada setor avaliado. Inicialmente, avalia-se o consumo energético. Para tanto, utiliza-se os dados obtidos a partir do BEN [EPE, 2018], com destaque para as principais fontes utilizadas e para a fração do consumo relativa à energia térmica, calor. A seguir, os dados financeiros das indústrias, bem como dos setores, são analisados em nível nacional, regional e estadual.

No terceiro Subcapítulo, identifica-se quais são os tipos de coletores mais utilizados pelas indústrias avaliadas. Na sequência, compara-se as temperaturas de operação de cada processo com as faixas de temperatura de serviço dos coletores solares térmicos. Por último, apresenta-se mapas que relacionam o recurso solar de cada região do país com o tipo de indústria avaliado. Com isso é possível identificar onde se concentram as indústrias de cada setor e qual o recurso solar correspondente.

4.1.1 Consumo energético

Utilizando a classificação proposta por Pereira, 2018, a qual define que toda a energia utilizada na indústria, que não é eletricidade, é calor, tem-se a distribuição do consumo energético em termos do tipo de energia, Figura 4.1, e, conseqüentemente, em termos do tipo de fonte. Dentre as fontes utilizadas para a geração de calor, a biomassa se destaca. Mais precisamente o bagaço de cana, devido à grande produção do setor sucroalcooleiro.

O setor de químicos apresenta uma divisão de consumo, entre eletricidade e calor, Figura 4.2, semelhante à divisão de consumo da indústria brasileira, Figura 4.1. Para esse setor, aproximadamente 74% do total de energia consumida é destinada à geração de calor. Dentre as fontes utilizadas, destacam-se o gás natural, com 31%, e as fontes secundárias de petróleo, que consistem principalmente em gás de refinaria e coque de petróleo, com 33%. Outros

combustíveis também são utilizados pelo setor. Porém, todos apresentam baixa contribuição no consumo, quando comparados às duas fontes anteriormente citadas.

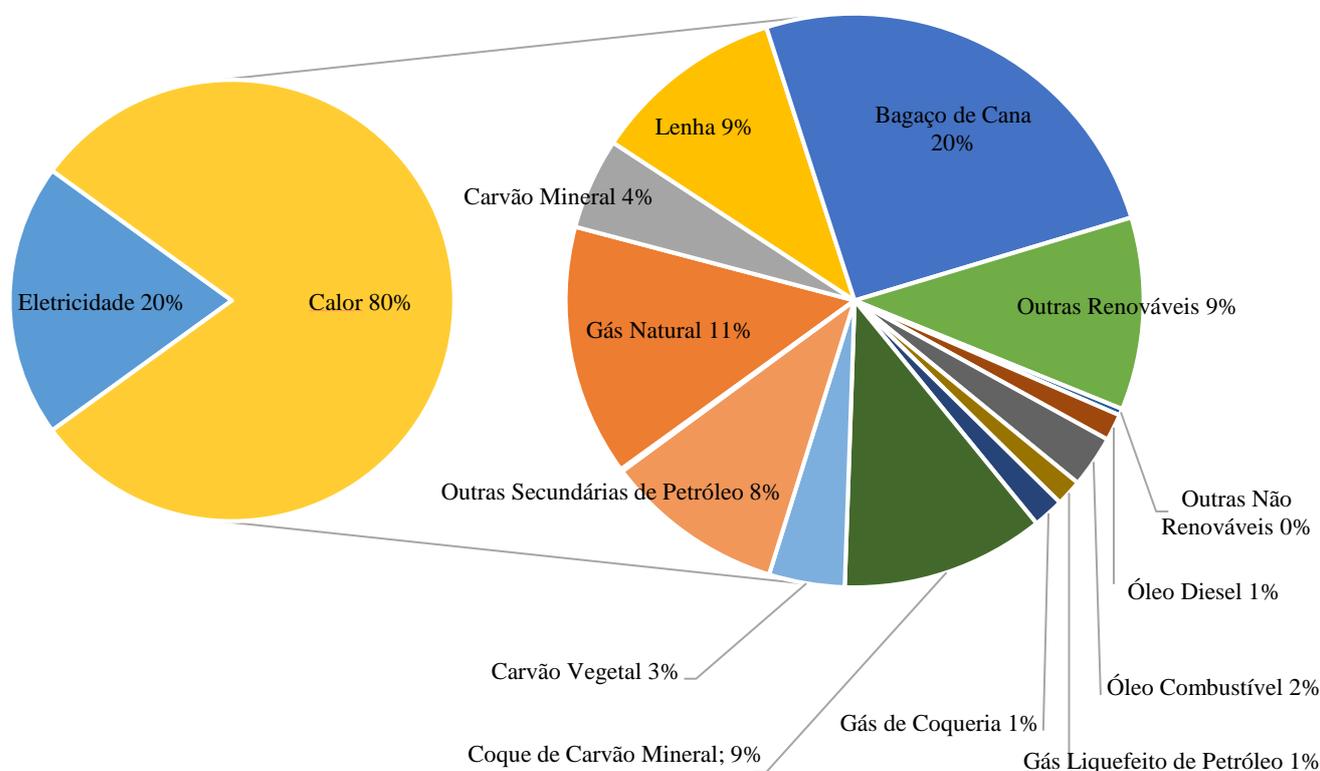


Figura 4.1 – Consumo energético das indústrias brasileiras, destacando os combustíveis utilizados para geração de calor. [Adaptado de EPE, 2018]

A indústria têxtil, por sua vez, apresenta um percentual de consumo de eletricidade, Figura 4.3, três vezes superior ao percentual de consumo da indústria brasileira, Figura 4.1. Entretanto, diversos processos do setor utilizam água quente, ou vapor, tornando comum o uso de caldeiras neste tipo de indústrias. Esse fato se confirma ao se avaliar a elevada participação do gás natural e da lenha nas fontes de energia destinadas à geração de calor.

O setor de papel e celulose destaca-se pela alta demanda de calor, uma vez que 84% da energia consumida tem essa finalidade, Figura 4.4. Entretanto, ao longo do processo produtivo do papel, quando a madeira é utilizada como matéria prima, é gerado um subproduto, chamado lixívia, ou licor negro, que é aproveitado como combustível. Assim, nesse caso, a lixívia é a fonte de energia mais utilizada para geração de calor.

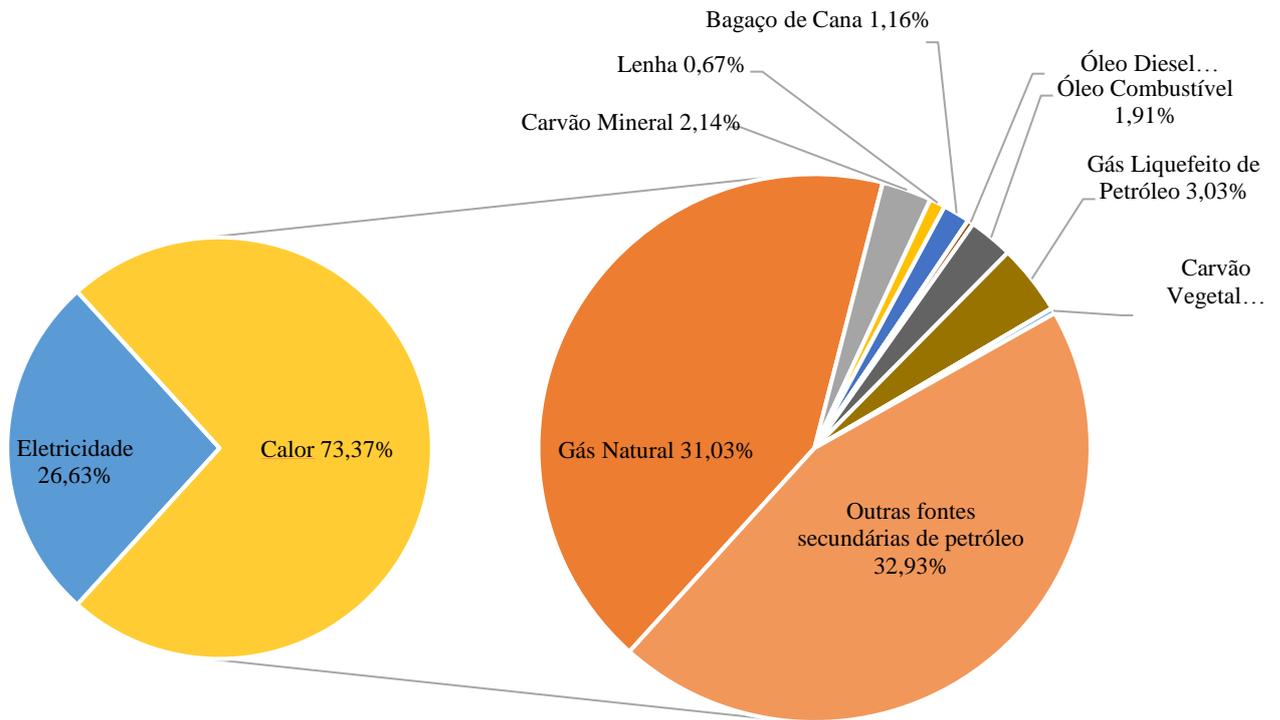


Figura 4.2 – Consumo energético do setor químico, destacando os combustíveis utilizados para geração de calor. [Adaptado de EPE, 2018]

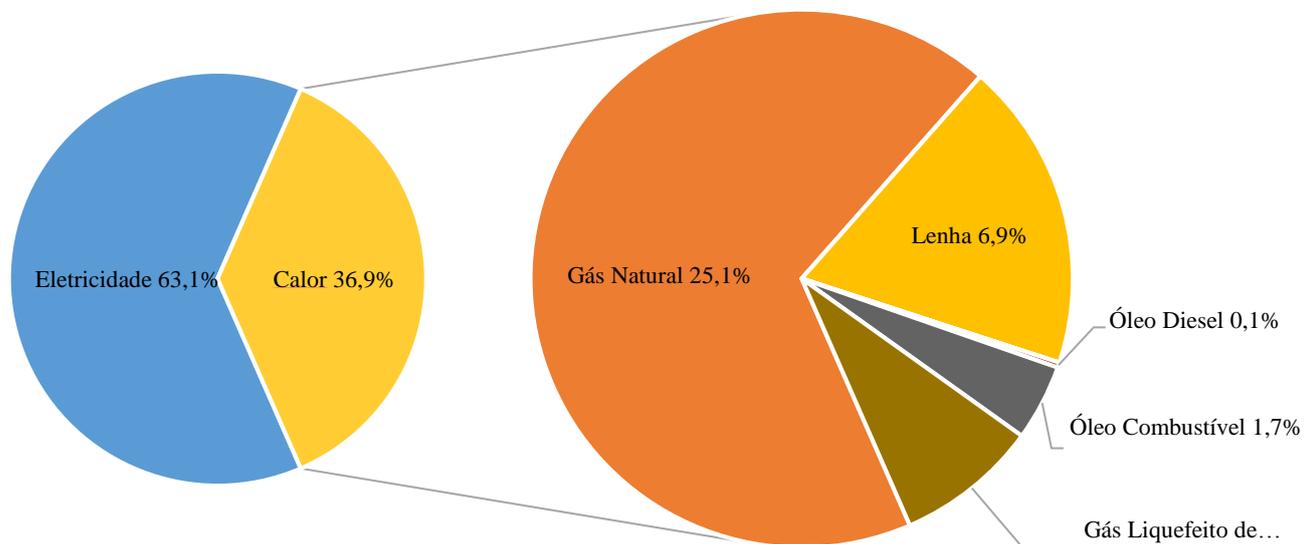


Figura 4.3 – Consumo energético do setor têxtil, destacando os combustíveis utilizados para geração de calor. [Adaptado de EPE, 2018]

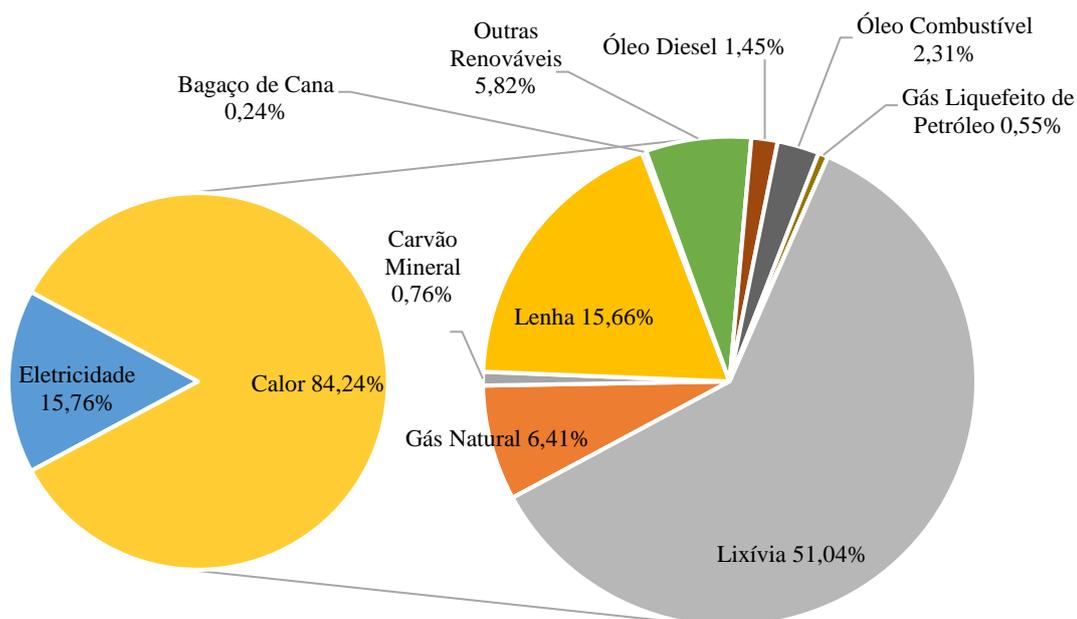


Figura 4.4 – Consumo energético do setor de papel e celulose, destacando os combustíveis utilizados para geração de calor. [Adaptado de EPE, 2018]

O setor de alimentos e bebidas tem o maior consumo de calor, dentre os setores avaliados. Como se pode observar na Figura 4.5, quase 90% da energia consumida é na forma de calor. Porém, quando avaliados os combustíveis utilizados pelo setor, tem-se a predominância do uso do bagaço de cana. Este consumo se dá no setor sucroalcooleiro, no qual, após a cana passar pelo processo de moagem, seu bagaço é destinado às caldeiras para queima. O vapor obtido através do calor, resultante desta queima, é utilizado no processo produtivo e na geração de eletricidade.

Desta forma, foi desconsiderado o consumo de bagaço de cana, e elaborado um novo gráfico de consumo, Figura 4.6. Nele, além da esperada redução na demanda por calor, percebe-se uma participação expressiva de lenha e de gás natural como principais combustíveis.

Na Tabela 4.1 são sumarizados os principais resultados apresentados nessa Seção. Nessa Tabela, os setores avaliados foram ordenados em função da porcentagem de calor demandada.

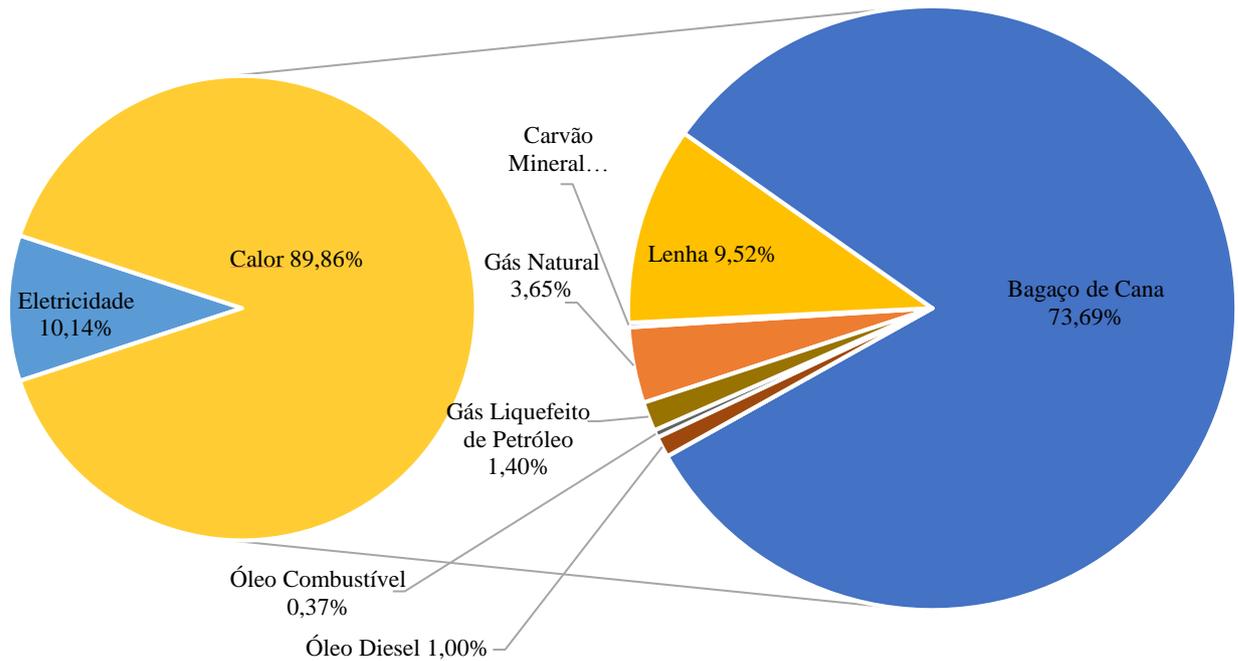


Figura 4.5 – Consumo energético do setor de alimentos e bebidas, destacando os combustíveis utilizados para geração de calor. [Adaptado de EPE, 2018]

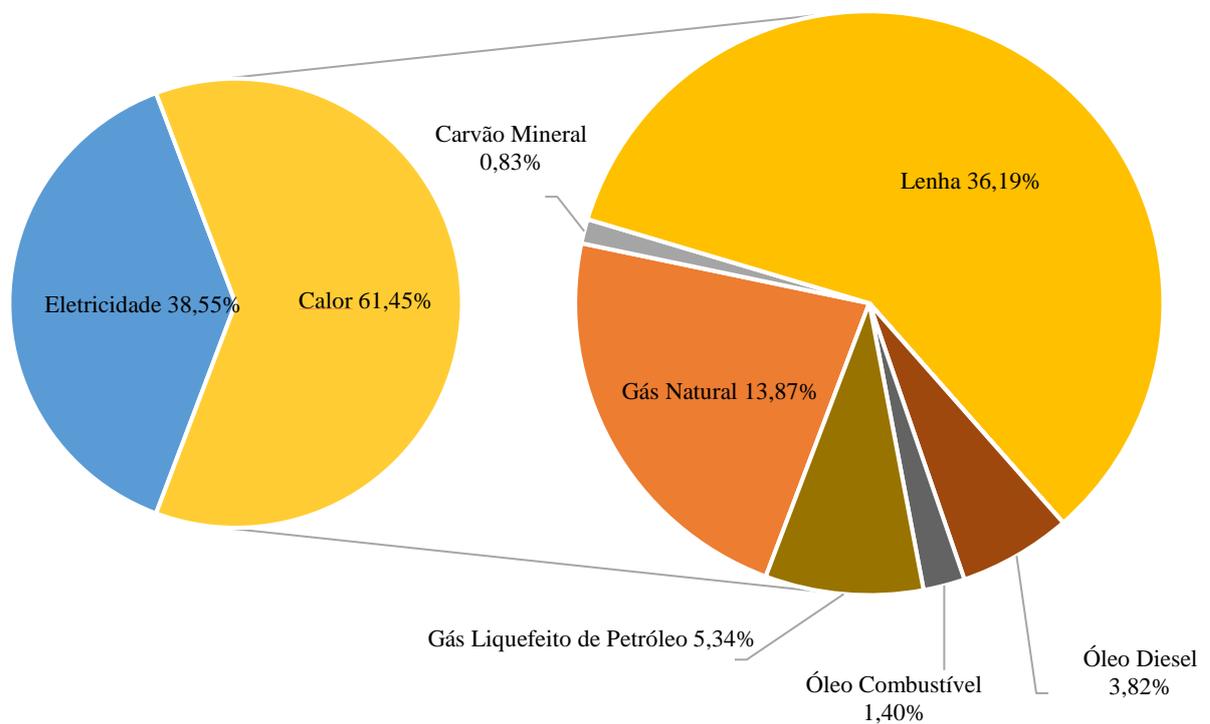


Figura 4.6 – Consumo energético do setor de alimentos e bebidas, desconsiderando a indústria sucroalcooleira, destacando os combustíveis utilizados para geração de calor. [Adaptado de EPE, 2018]

Tabela 4.1 – Resumo dos principais resultados da Seção, destacando a parcela do consumo energético de cada setor destinada à geração de calor, e a fonte com maior contribuição.

Setor	Calor [%]	Fonte Principal
Alimentos	89,86	Bagaço de Cana (73,69%)
Papel e Celulose	84,24	Lixívia (51,04%)
Químico	73,37	Gás Natural (31,03%)
Alimentos (sem ind. sucroalcooleira)	61,45	Lenha (36,19%)
Têxtil	36,9	Gás Natural (25,1%)

4.1.2 Impacto econômico

A fim de determinar os setores com maior potencial de investimento, foram utilizados indicadores financeiros. Assim, inicialmente foi avaliada a participação de cada setor no Produto Interno Bruto, PIB, industrial nacional. Como se observa na Figura 4.7, o setor de alimentos¹ tem uma participação expressiva no PIB industrial, representando 12,3% do mesmo. Já a indústria química representa 5,4%, valor superior às contribuições do setor têxtil, 1,05%, e do setor de papel e celulose, 2,5%.

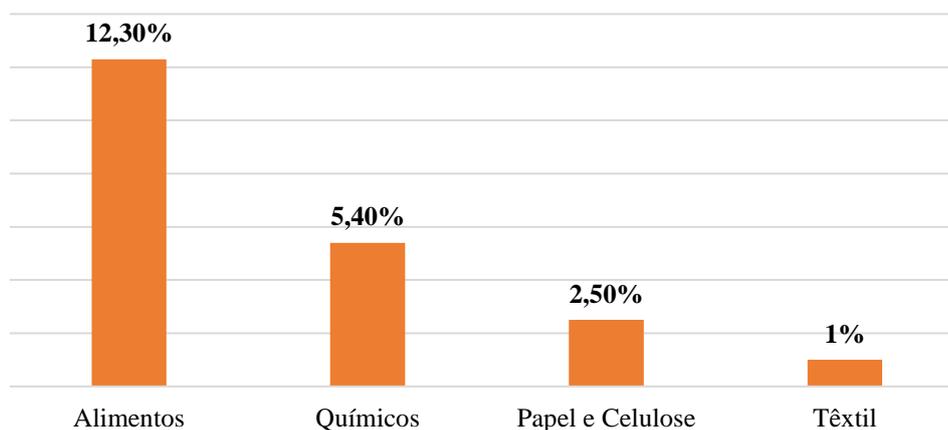


Figura 4.7 – Porcentagem de participação dos setores avaliados no PIB industrial nacional. [Adaptado de CNI, 2018]

Na Tabela 4.2 apresenta-se um detalhamento do PIB industrial nacional para as unidades federativas, UF, e regiões brasileiras. A segunda coluna explicita a contribuição de cada UF no

¹ Nesta seção 4.1.2, a fonte de dados utilizada [CNI, 2018] para o setor alimentício, não contempla os dados do setor de bebidas, como na Seção 4.1.1. Desta forma, o referido setor será chamado apenas de setor alimentício, ou de alimentos.

PIB industrial nacional. A terceira coluna apresenta o impacto do setor industrial no PIB de cada UF. Nas colunas restantes, apresenta-se a contribuição de cada setor, bem como a soma dos quatro setores, no PIB industrial da UF. Também são apresentados os totais por região, Tabela 4.2 e Figura 4.8.

Tabela 4.2 – Participação de cada UF na composição do PIB industrial nacional, da indústria no PIB de cada UF, e dos setores de interesse no PIB industrial das UF.[Adaptado de CNI, 2018]

UF/Região	Participação no PIB nacional [%]	Participação da indústria no PIB da UF [%]	Participação de cada setor na composição do PIB industrial das UF's				Total
			Alimentos	Papel e Celulose	Química	Têxtil	
RS	7,1	23,0	15,7	2,2	7,8	0,7	26,4
SC	5,1	27,1	15,5	3,6	2,2	5,0	26,3
PR	7,8	25,7	18,1	4,5	3,4	0,6	26,6
SUL			16,6	3,5	4,7	1,8	26,6
SP	32,1	21,4	13,0	2,8	7,9	1,1	24,8
RJ	8,6	18,2	1,6	0,3	4,6	0,2	6,7
MG	10,3	24,8	12,7	1,3	3,8	0,8	18,6
ES	2,0	24,5	6,2	6,8	1,2	0,1	14,3
SUDESTE			10,9	2,2	6,3	0,8	20,2
MT	1,6	16,4	31,9	0	4,2	0,4	36,5
MS	1,6	22,6	23,9	13,4	1,1	0,7	39,1
GO	3,2	22,9	23,5	0,9	3,5	0,1	28
DF	0,8	4,7	6,1	0,1	0,2	0,1	6,5
CENTRO-OESTE			21,7	3,4	2,7	0,3	28,1
BA	4,7	23,7	5,4	4,3	12,0	0,6	22,3
SE	0,6	20,1	7,6	0,3	2,4	1,6	11,9
AL	0,5	12,4	24,0	0,0	11,3	0,1	35,4
PE	2,5	19,7	17,4	1,6	7,7	0,4	27,1
PB	0,7	15,6	7,8	0,2	0,7	3,2	11,9
RN	0,9	19,0	8,0	0,1	0,5	2,2	10,8
CE	2,0	19,2	9,0	0,8	1,8	2,1	13,7
PI	0,4	12,7	10,1	0,2	1,5	0,0	11,8
MA	1,1	17,4	4,4	10,2	2,8	0,0	17,4
NORDESTE			9,3	2,8	6,8	1,0	19,9

Tabela 4.2 – Participação de cada UF na composição do PIB industrial nacional, da indústria no PIB de cada UF, e dos setores de interesse no PIB industrial das UF (continuação).

[Adaptado de CNI, 2018]

UF/Região	Participação no PIB [%]	Impacto da Indústria no PIB da UF [%]	Participação de cada setor na composição do PIB industrial das UF's				Total
			Alimentos	Papel e Celulose	Química	Têxtil	
AM	2,3	34,7	0,8	0,5	1,5	0	2,8
RR	0,1	11,6	9,8	0	0	0	9,8
AP	0,1	11,8	2,5	0	0	0	2,5
TO	0,3	13,3	17,2	0	1,1	0	18,3
RO	0,6	18,6	24,6	0	0,3	0	24,9
AC	0,1	8,6	24,1	0	0,3	0	24,4
PA	2,7	25,3	6,4	0,5	1	1,0	8,9
NORTE			6,8	4	1,1	0	11,9

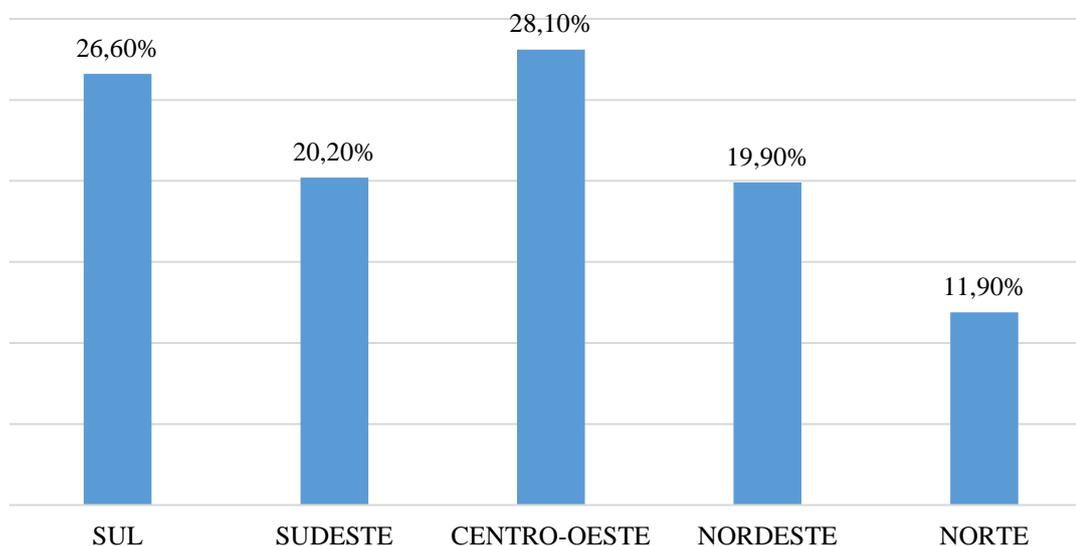


Figura 4.8 – Contribuição de cada região, em porcentagem, no PIB industrial nacional.[Adaptado de CNI, 2018]

A partir da Tabela 4.2, e da Figura 4.8, percebe-se que as regiões que mais contribuem para o PIB industrial nacional são as regiões Centro-Oeste e Sul. Nessas regiões, dentre os setores avaliados, o setor de alimentos é o que mais contribui para o PIB industrial regional,

sendo expressivo em todas as UF que compõem essas regiões, com exceção do DF. As cinco UFs com maior participação desse setor no PIB são, em ordem decrescente: Mato Grosso, MT, Rondônia, RO, Acre, AC, Alagoas, AL e Mato Grosso do Sul, MS. Os dados destes estados, referentes ao setor de alimentos, estão destacados na Figura 4.9.

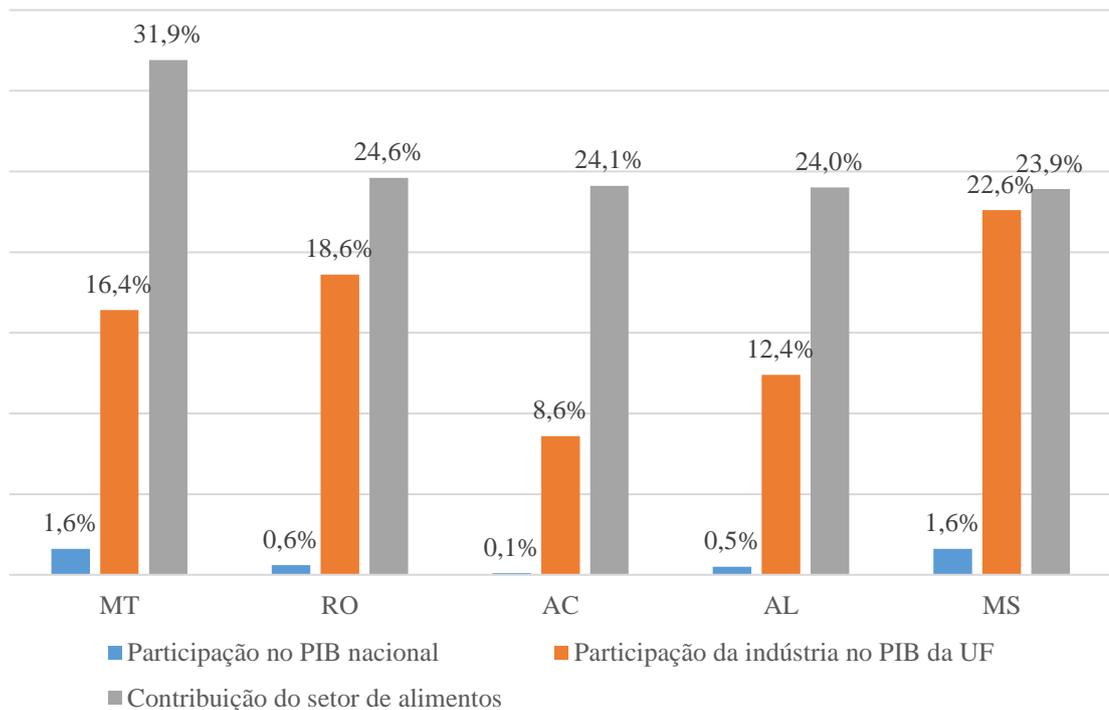


Figura 4.9 – UFs com maior participação do setor alimentício na composição de seu PIB.

[Adaptado de CNI, 2018]

Como se observa na Figura 4.9, os estados com maior participação do setor de alimentos na composição do seu PIB apresentam baixas participações na composição do PIB nacional. Dessa forma, ainda que estes setores sejam relevantes na economia das UF, no cenário nacional se mostram pouco impactantes. Assim, considerando o valor monetário gerado pelo setor em cada UF, os cinco maiores contribuintes são, em ordem decrescente: São Paulo, SP (R\$ 48 bilhões), Paraná, PR (R\$ 16,34 bilhões), Minas Gerais, MG (R\$ 15,03 bilhões), Rio Grande do Sul, RS (R\$ 12,83 bilhões) e Santa Catarina, SC (R\$ 9,16 bilhões). Estas UF possuem uma menor contribuição do setor alimentício na composição do seu PIB, quando comparadas às anteriormente citadas. Entretanto, estas UF se destacam por possuírem uma contribuição mais significativa na composição do PIB nacional

O setor de papel e celulose tem maior participação no PIB dos estados do Maranhão, MA e Espírito Santo, ES. Com relação ao PIB estadual, as cinco UF que possuem as maiores contribuições desse setor são, em ordem decrescente: Mato Grosso do Sul, MS, Maranhão, MA, Espírito Santo, ES, Paraná, PR e Bahia, BA. A Figura 4.10 traz em detalhe a contribuição do setor nestas UFs.

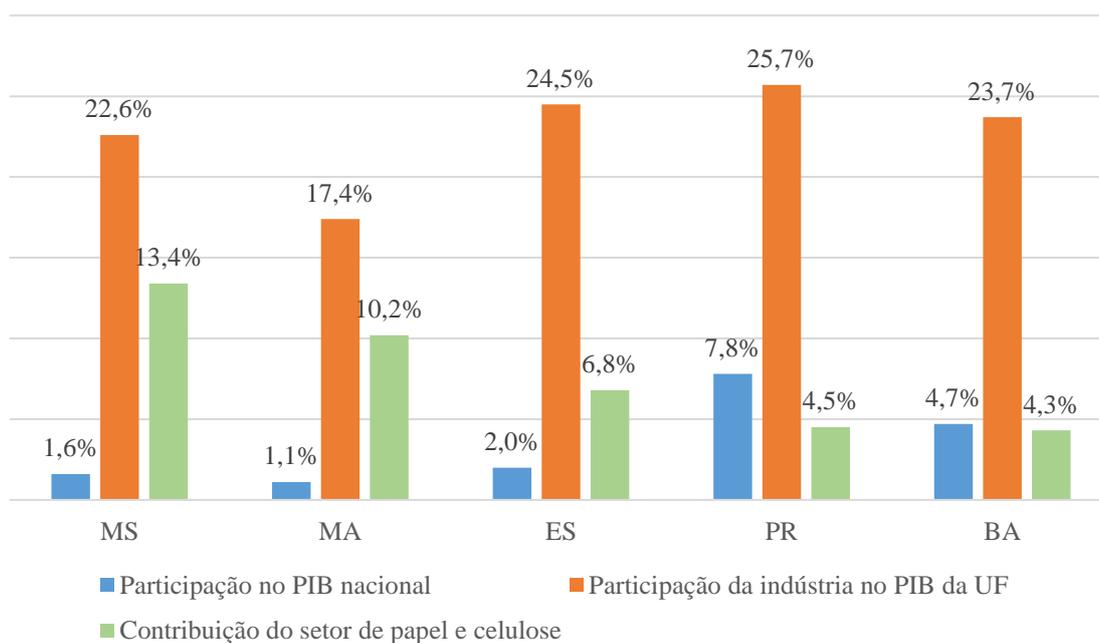


Figura 4.10 – UFs com maior participação do setor de papel e celulose na composição de seu PIB. [Adaptado de CNI, 2018]

Novamente observa-se que as UFs com maior contribuição do setor em seu PIB têm pouco impacto no cenário nacional. Isso não é válido, entretanto, para os estados do Paraná e da Bahia, que, por apresentarem uma contribuição expressiva ao PIB nacional, figuram entre as cinco UFs com maiores valores de PIB do setor de papel e celulose. Em ordem decrescente são: São Paulo, SP (R\$ 10,34 bilhões), Paraná, PR (R\$ 4,06 bilhões), Mato Grosso do Sul, MS (R\$ 2,5 bilhões), Bahia, BA (R\$ 2,33 bilhões) e Santa Catarina, SC (R\$ 2,13 bilhões).

Ainda com relação ao estado da Bahia, é a indústria química que apresenta a maior contribuição para o PIB industrial estadual. Esse setor também apresenta valores significativos, em ordem decrescente, nas seguintes UFs: Alagoas, AL, São Paulo, SP, Rio Grande do Sul, RS

e Pernambuco, PE. Embora, nesses estados esse não seja o setor de maior contribuição para o PIB industrial. Detalhes sobre a contribuição destas cinco UFs estão na Figura 4.11.

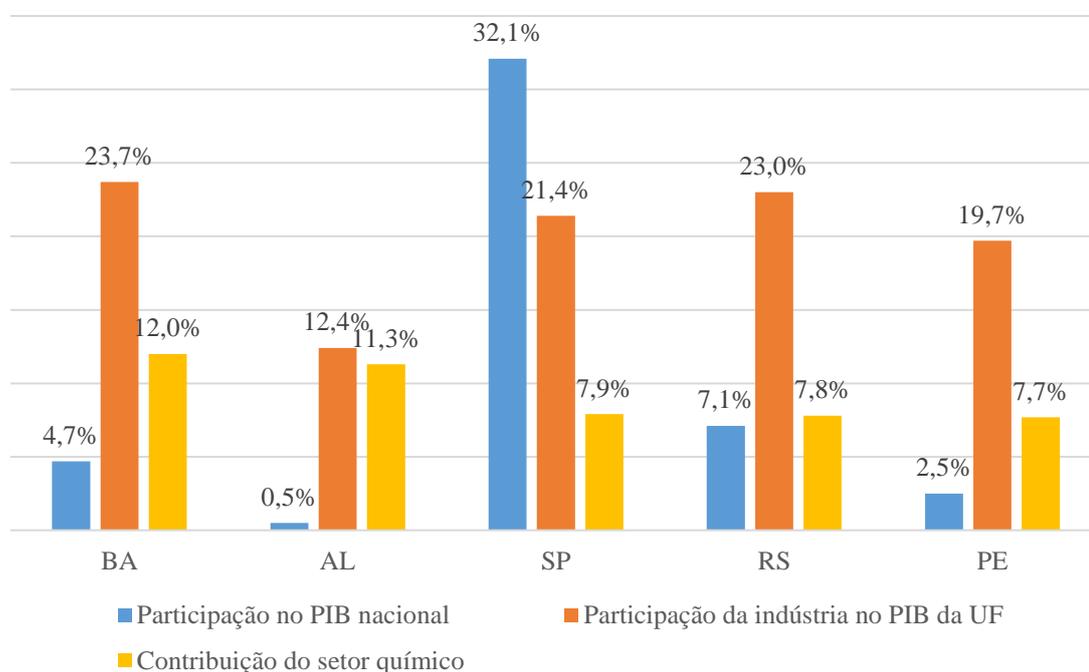


Figura 4.11 – UFs com maior participação do setor químico na composição de seu PIB.

[Adaptado de CNI, 2018]

Pode-se observar que os estados de Alagoas e Pernambuco apresentam uma baixa contribuição ao PIB nacional. Assim, apenas estes dois estados não figuram entre as cinco UFs com maior valor de PIB do setor químico. Essas são, em ordem decrescente: São Paulo, SP (R\$ 29,18 bilhões), Bahia, BA (R\$ 6,49 bilhões), Rio Grande do Sul, RS (R\$ 6,37 bilhões), Rio de Janeiro, RJ (R\$ 4,54 bilhões) e Minas Gerais, MG (R\$ 4,5 bilhões).

Já o setor têxtil não figura como a maior contribuição para o PIB industrial, dentre os setores avaliados, em nenhuma UF. Entretanto, possui contribuições significativas nas UF de Santa Catarina, SC, Paraíba, PB, Rio Grande do Norte, RN e Ceará, CE, sendo nesses estados o segundo setor de maior impacto no PIB. Detalhes sobre as cinco UFs com maior contribuição do setor têxtil são vistos na Figura 4.12.

A partir da Figura 4.12, nota-se que apenas o estado de Santa Catarina apresenta uma participação expressiva no PIB nacional. Isso pode ser observado quando avaliado o valor do PIB do setor em cada UF, onde apenas esse estado figura entre as cinco maiores. Estas são, com

seus respectivos valores: São Paulo, SP (R\$ 4,09 bilhões), Santa Catarina, SC (R\$ 2,94 bilhões), Minas Gerais, MG (R\$ 0,95 bilhões), Rio Grande do Sul, RS (R\$ 0,57 bilhões) e Paraná, PR (R\$ 0,54 bilhões)

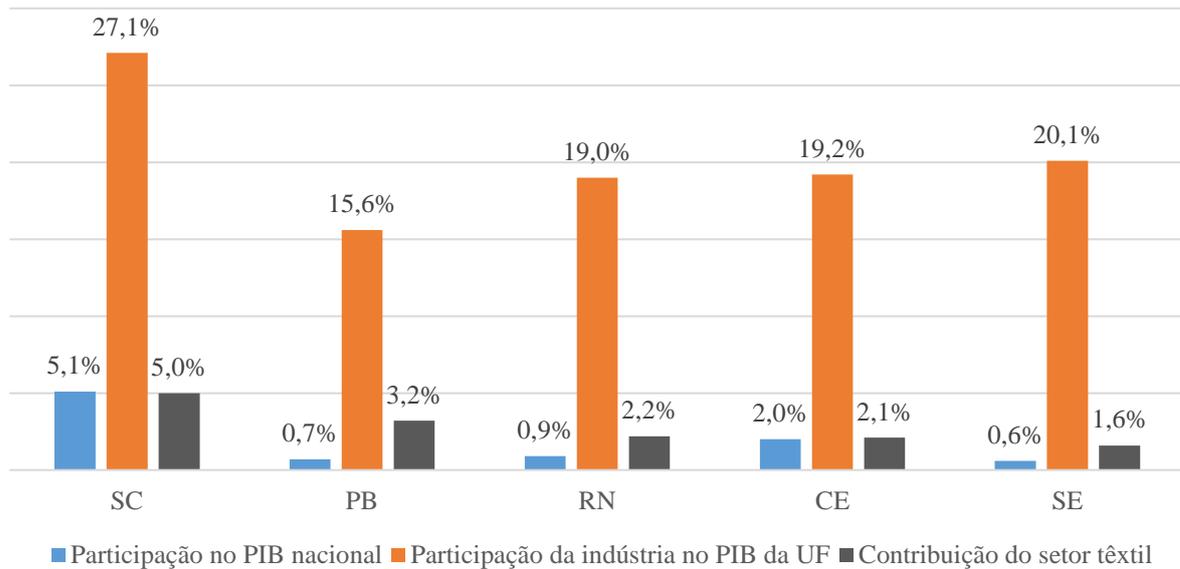


Figura 4.12 – UFs com maior participação do setor têxtil na composição de seu PIB.

[Adaptado de [CNI, 2018]]

O último indicador financeiro avaliado foi o investimento na aquisição de ativos imobilizados. Esse indicador representa o quanto foi investido pelos setores, no ano na aquisição de bens tangíveis, necessários à manutenção ou ampliação das atividades das empresas.

A Figura 4.13 apresenta os investimentos realizados no ano de 2016. Os setores de químicos e de papel e celulose foram os que apresentam maiores valores. Esse comportamento pode ser interpretado como uma tendência em investir em melhorias para os equipamentos e processos utilizados [IBGE, 2016].

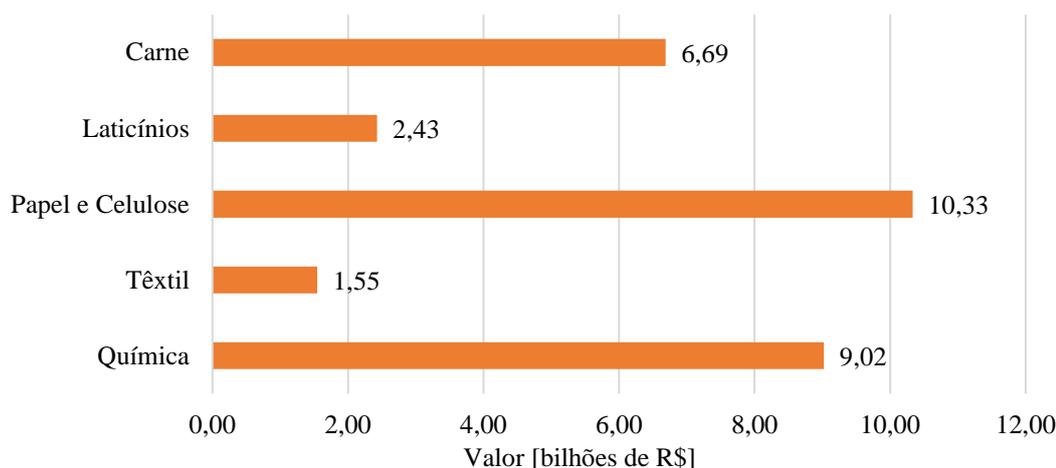


Figura 4.13 – Investimentos em ativos imobilizados pelos setores estudados. [Adaptado de IBGE, 2016]

4.1.3 Sistemas SHIP instalados no mundo

Com base no banco de dados disponibilizado pela IEA, 2018, foram elaboradas tabelas (disponíveis nos Apêndices A1, A2, A3, A4 e A5) contendo os dados divulgados das instalações existentes nos setores de interesse. A análise desses dados pode contribuir para a determinar um padrão de tipo de coletor mais utilizado por cada um dos setores avaliados.

A Figura 4.14 abaixo resume os dados referentes aos setores de interesse desse estudo. Observa-se que o número total de instalações, em cada setor, é apresentado em termos dos diferentes tipos de coletores utilizados em cada instalação. Os coletores identificados são os seguintes: coletor de placa plana, FPC, coletor de tubo evacuado, ETC, coletor parabólico composto, CPC, refletor linear Fresnel, LFR, coletor parabólico em calha, PTC, e refletor em disco parabólico, PDR. Dados adicionais sobre estas instalações podem ser encontrados nas Tabelas A.1 à A.5 do Apêndice A – Indústrias com instalações de SHIP no mundo.

Como também se observa na Figura 4.14, há uma predominância de instalações no setor de laticínios, 34 ao total. Em seguida, figuram os setores têxtil e de carne, que possuem 15 instalações cada. Já no setor de químicos existem registros de 8 instalações, enquanto que no setor de papel e celulose apenas 2.

Quanto à tecnologia empregada nas instalações, percebe-se a predominância de instalações de coletores de placa plana, FPC, exceto no setor de papel e celulose. Isto pode ser atribuído ao seu custo reduzido e à sua simplicidade de instalação e de manutenção, visto que

a maioria destes SAS é utilizada para pré-aquecimento de água de caldeira, ou diretamente para limpeza. Observa-se, também, a participação expressiva de coletores dos tipos PTC e PDR. Estes coletores atingem temperaturas mais elevadas que os FPC, sendo usualmente utilizados para pré-aquecimento de água de caldeira, ou para geração direta de vapor, podendo ser conectados em série, ou em paralelo, com o sistema de geração de vapor preexistente na indústria.

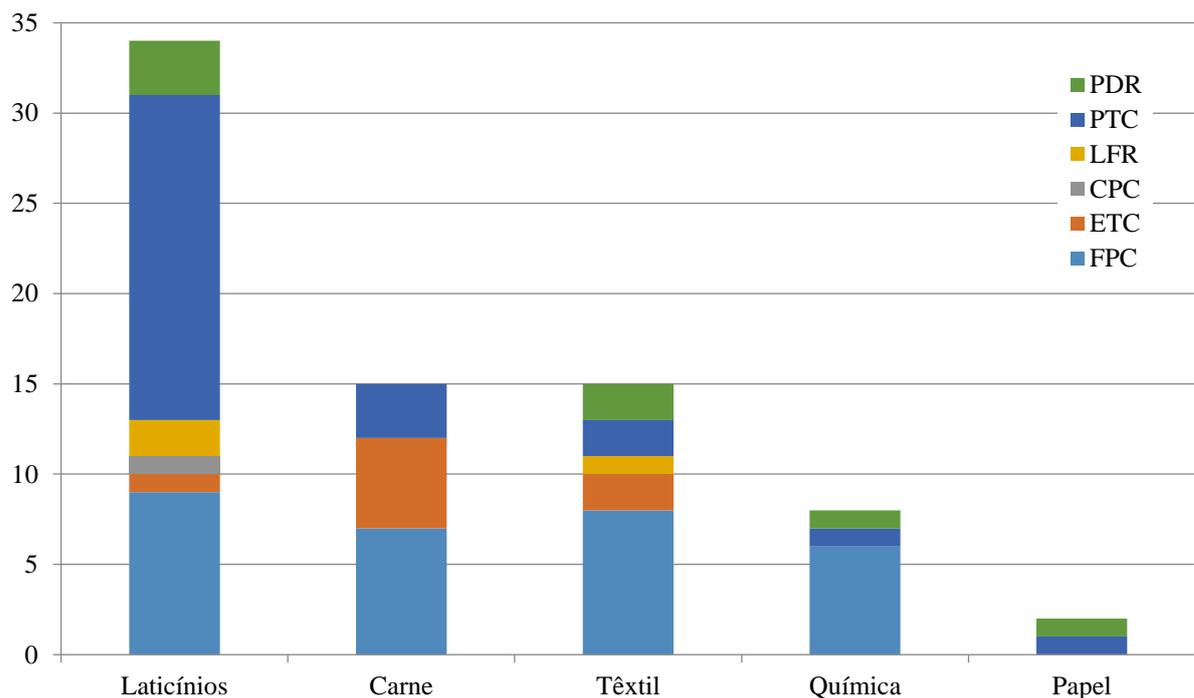


Figura 4.14 – Instalações existentes no mundo, para os setores avaliados, em termos dos tipos de coletores solares térmicos utilizados. [Adaptado de IEA, 2018]

4.1.4 Comparativo entre temperaturas de processo

Para determinar quais coletores melhor se adequam aos requisitos de cada setor, além do estudo das instalações já existentes, é conveniente comparar as faixas de operação dos coletores com as temperaturas requeridas pelos principais processos identificados. Na Tabela 4.3 abaixo, os principais processos, bem como processos comuns a todos os setores, têm sua temperatura de operação comparada ao intervalo de temperatura de serviço dos coletores disponíveis no mercado.

Tabela 4.3 – Temperaturas de operação dos coletores e de processos dos setores avaliados. [Adaptado de Farjana et al., 2018a; Kalogirou, 2014; Sharma et al., 2017b]

Coletores		Temperatura [°C]	100	200
	Coletor de Placa Plana (FPC)			
	Coletor de Tubo Evacuado (ETC)			
	Coletor Parabólico Composto (CPC)			
	Refletor Linear Fresnel (LFR)			
	Coletor Parabólico em Calha (PTC)			
	Coletor de Calha Cilíndrica (CTC)			
	Refletor em Disco Parabólico (PDR)			
	Coletor de Campo Heliostático (HFC)			
Processos				
Laticínios	Pressurização			
	Esterilização			
	Secagem			
	Concentração			
Carne	Lavagem, esterilização			
	Cozimento			
Química	Borracha sintética			
	Destilação			
	Evaporação			
	Secagem			
	Espessamento			
Papel e Celulose	Cozimento, secagem			
	Branqueamento			
Têxtil	Branqueamento, tingimento			
	Secagem, desengorduramento			
	Estampagem			
	Acabamento			
Todos os setores	pré-aquecimento (caldeira)			
	Refrigeração solar			
	Aquecimento de prédios			

Como pode se observar na Tabela 4.3, todos os processos do setor de químicos requerem temperaturas elevadas, sendo recomendado o uso de coletores com concentração. Já os setores

têxtil e de papel e celulose têm suas demandas entre as faixas de temperatura baixa e média, podendo assim utilizar tanto coletores estacionários quanto coletores concentradores e não concentradores. Por fim, os setores de laticínios e de carne apresentam boa parte de suas temperaturas de operação em faixas que podem ser atendidas por coletores estacionários, como o FPC, bem como por coletores não concentradores.

4.1.5 Disponibilidade do recurso solar

A avaliação da disponibilidade do recurso solar é de suma importância nesse estudo. Assim, a localização das indústrias dos setores avaliados, disponibilizada pelo IBGE, 2015, foi comparada com os mapas de irradiação solar direta e de irradiação no plano inclinado da latitude, disponíveis no Atlas Brasileiro de Energia Solar [Pereira et al., 2017]. Esses dados, aliados à demanda térmica dos processos de cada setor, determinam qual é o tipo de coletor adequado para o uso de SHIP.

A fim de determinar o potencial de aplicação nas localidades, foram obtidos na bibliografia valores necessários para a correta utilização dos coletores. Desta forma, os valores adotados, tanto para a irradiação solar direta horizontal, quanto para a irradiação global no plano inclinado foram os seguintes: mínimo de 4.900 Wh/m² [de Souza e Cavalcante, 2017], médio de 5.200 Wh/m² [Sharma et al., 2015], e ideal de 5.500 Wh/m² [Suresh e Rao, 2017].

4.1.5.1 Indústria química

Haja vista que a demanda térmica da indústria química se dá em uma faixa de temperatura acima dos 100 °C, o uso de coletores solares com concentração é o mais indicado. Na Figura 4.15 tem-se a relação das localidades, com mais de dez indústrias do setor, com a média anual do total diário da irradiação solar direta.

Nela percebe-se que um aglomerado de indústrias, no estado de Santa Catarina, e nas regiões litorâneas dos estados do Paraná e de São Paulo, encontra-se em uma região de baixa irradiação. Por outro lado, os pontos localizados nas regiões Nordeste e Centro-Oeste, bem como no interior dos estados de São Paulo e de Minas Gerais, apresentam valores de irradiação mais elevados, sendo assim promissores à utilização de SHIP, com o uso de coletores com concentração.

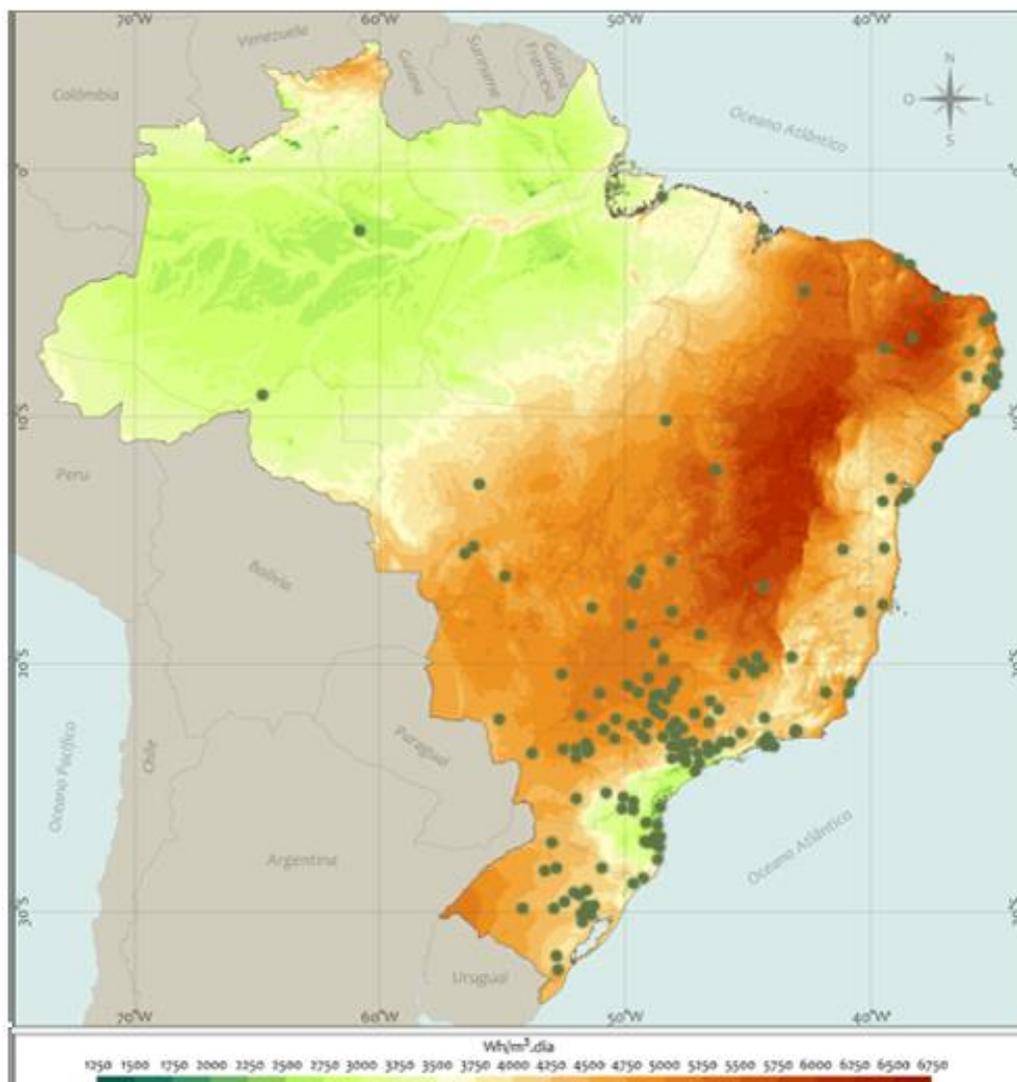


Figura 4.15 – Localidades com mais de dez indústrias do setor químico em mapa que apresenta a média anual do total diário da irradiação solar direta horizontal. [Adaptado de IBGE, 2015 e Pereira et al., 2017]

Mesmo com a demanda do setor por altas temperaturas, pode-se observar na Figura 4.14 que 75% das instalações registradas utilizam coletores do tipo FPC. Essas instalações caracterizam-se por atender, principalmente, processos de limpeza ou de pré-aquecimento da água da caldeira.

Quando considerada a irradiação média anual no plano inclinado, para o uso de coletores estacionários, poucos são os locais que não são propícios ao uso desse tipo de coletores, como as regiões litorâneas de baixa irradiação. Na Figura 4.16 apresenta-se os municípios com mais de dez indústrias, do setor químico, e a média anual do total diário da irradiação solar no plano inclinado da latitude.

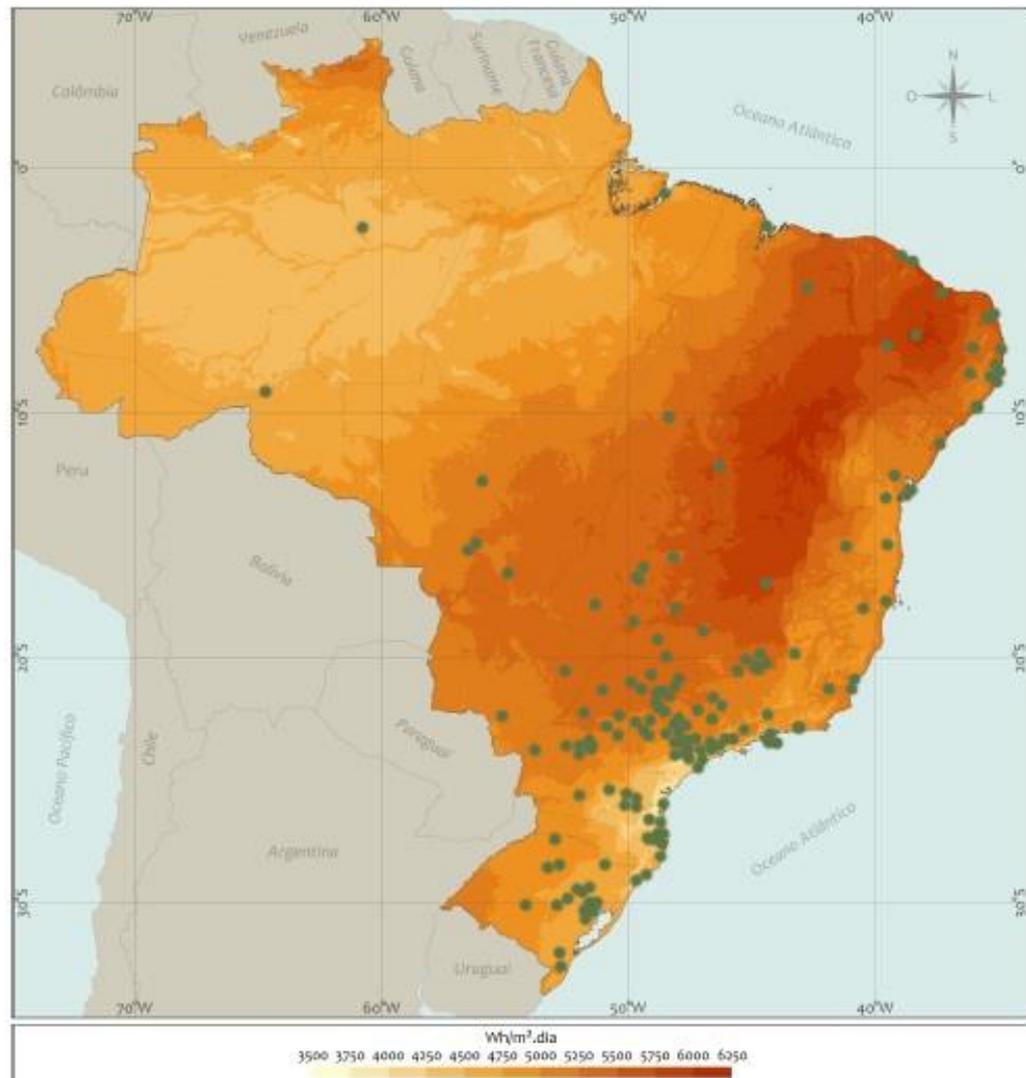


Figura 4.16 –Localidades com mais de dez indústrias do setor químico em mapa que apresenta a média anual do total diário da irradiação solar no plano inclinado da latitude.

[Adaptado de IBGE, 2015 e Pereira et al., 2017]

4.1.5.2 Indústria têxtil

A indústria têxtil possui processos que dependem de diferentes faixas de temperatura, sendo possível aplicar tanto coletores estacionários quanto concentradores. Assim, avaliando-se inicialmente a viabilidade do uso de coletores solares concentradores, tem-se na Figura 4.17 a localização das indústrias do setor têxtil e a média anual do total diário da irradiação solar direta.

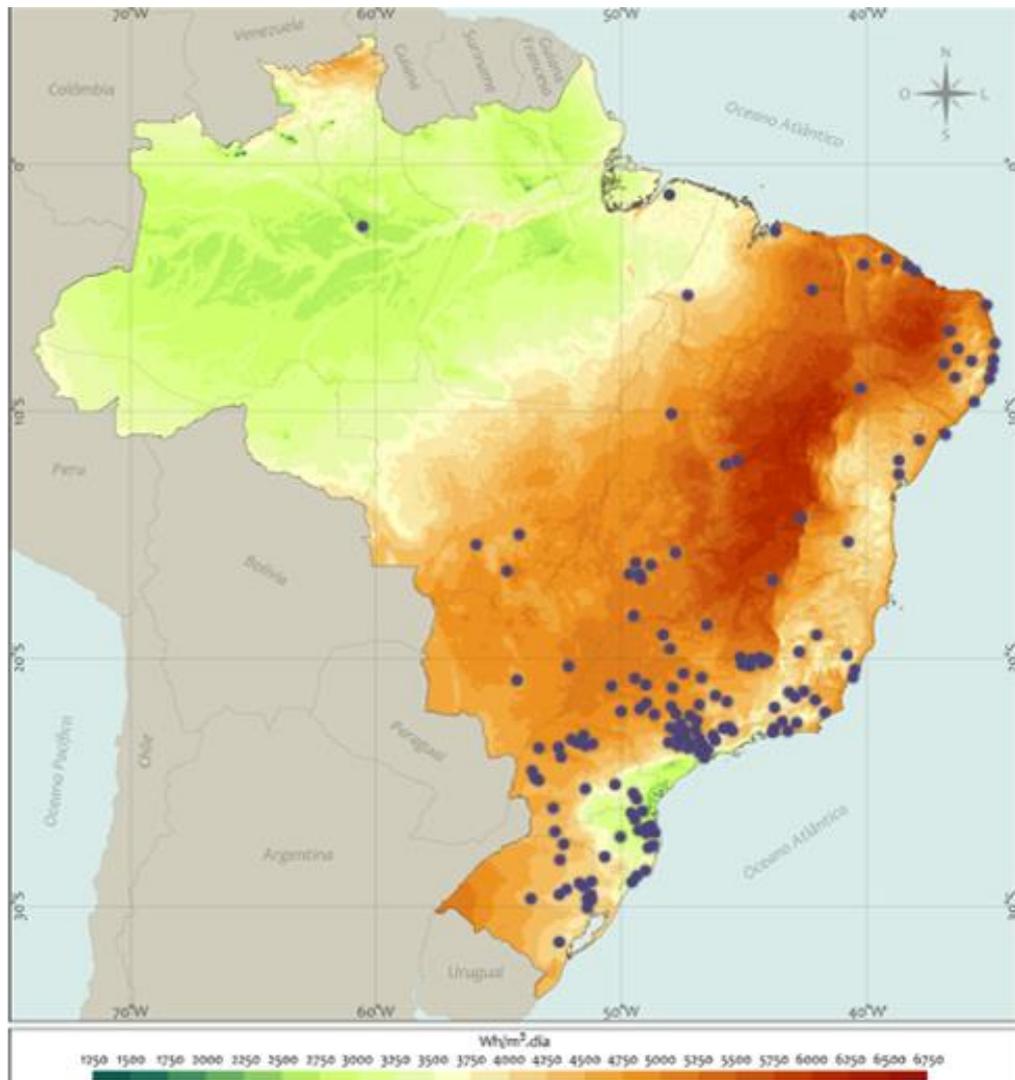


Figura 4.17 – Localidades com mais de dez indústrias do setor têxtil em mapa que apresenta a média anual do total diário da irradiação solar direta horizontal.[Adaptado de IBGE, 2015 e Pereira et al., 2017]

Conforme se observa na Figura 4.17, são poucas as localidades com concentração de indústrias do setor têxtil que se recebem uma elevada quantidade de irradiação solar direta. Contudo, são exceção alguns pontos das regiões Sudeste e Centro-Oeste, bem como pontos isolados na região Nordeste.

Para a avaliação do uso de coletores estacionários, a Figura 4.18 apresenta a localização das indústrias do setor têxtil e a média anual do total diário da irradiação solar no plano inclinado da latitude. Nesta percebe-se um potencial significativo para a aplicação de coletores.

Apenas um aglomerado de indústrias, no litoral do estado de Santa Catarina, está localizado em uma região de baixa irradiação anual.

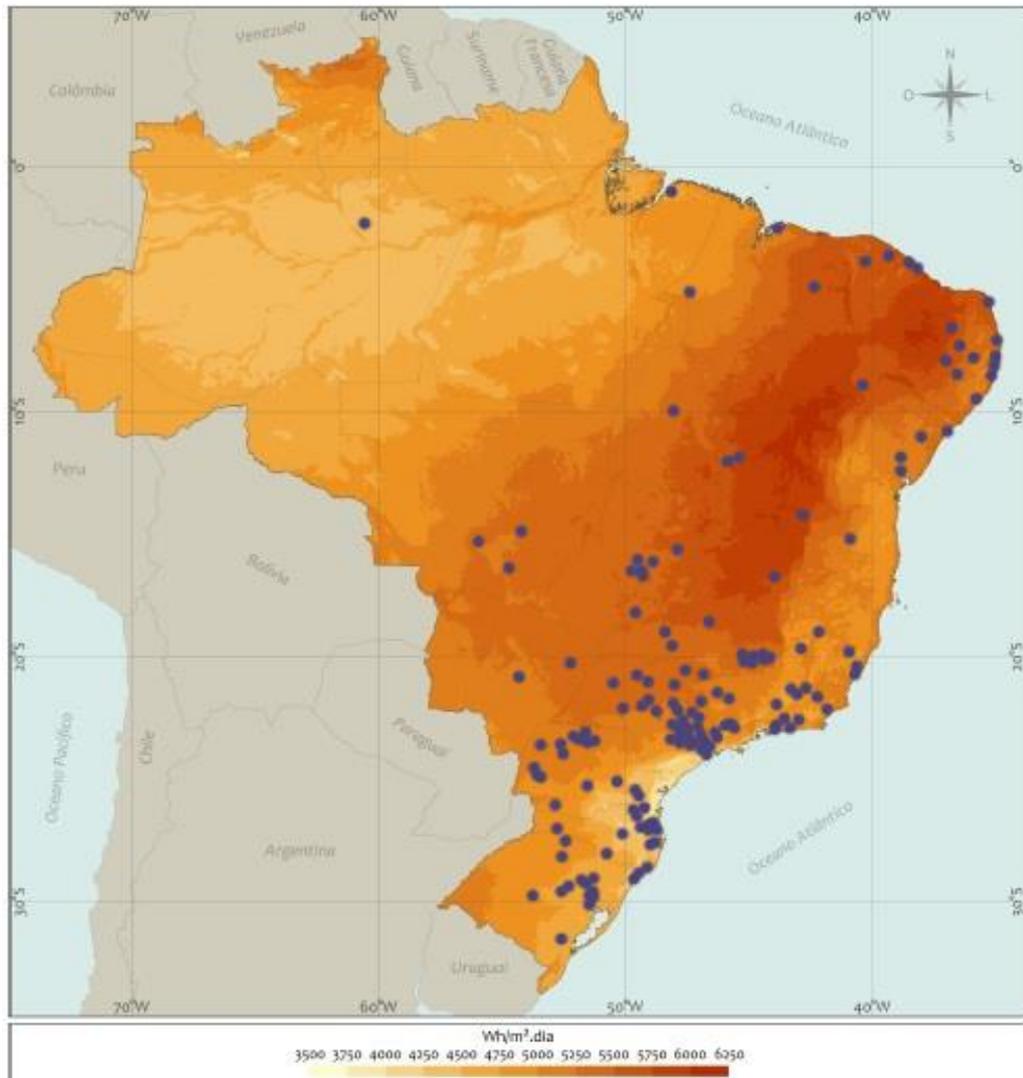


Figura 4.18 – Localidades com mais de dez indústrias do setor têxtil em mapa que apresenta a média anual do total diário da irradiação solar no plano inclinado da latitude. [Adaptado de IBGE, 2015 e Pereira et al., 2017]

4.1.5.3 Indústria do papel e celulose

O setor de papel e celulose, de forma similar ao setor têxtil, apresenta demandas de calor a diferentes temperaturas, podendo ser atendido tanto por coletores estacionários, quanto por coletores concentradores. Na Figura 4.19, tem-se a relação entre a localização das indústrias do setor e a média anual do total diário da irradiação solar direta.

Como se observa na Figura 4.19, os pontos localizados na região Norte e na faixa litorânea, de Santa Catarina até São Paulo, possuem baixa irradiação solar direta anual. Enquanto que poucos pontos nas regiões Centro-Oeste e Nordeste encontram-se em áreas de alta irradiação solar direta. A grande maioria das localidades, com concentração de indústrias do setor, recebem valores de irradiação próximos à média.

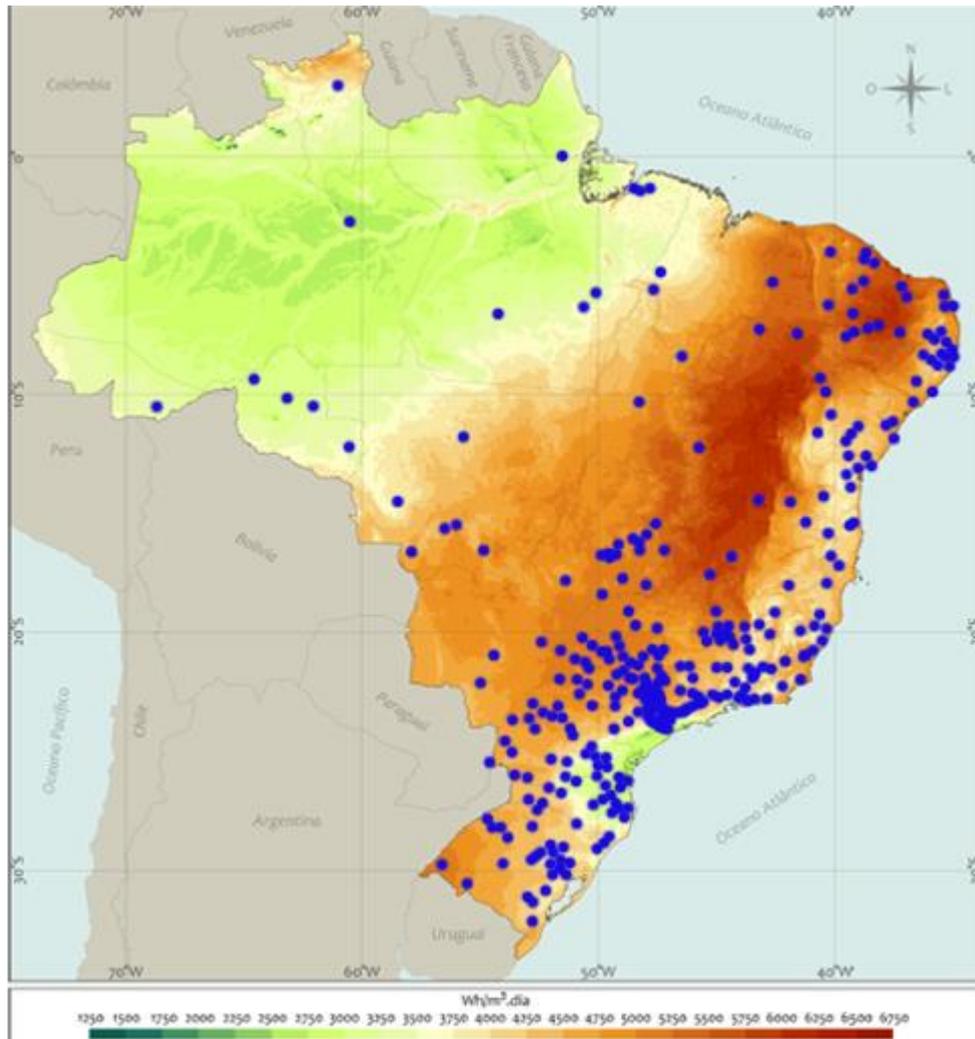


Figura 4.19 – Localidades com mais de dez indústrias do setor de papel e celulose em mapa que apresenta a média anual do total diário da irradiação solar direta horizontal.[Adaptado de IBGE, 2015 e Pereira et al., 2017]

Ainda que as poucas instalações do setor utilizem coletores com concentradores, as temperaturas necessárias aos processos podem ser supridas por coletores estacionários. Assim, na Figura 4.20 apresenta-se a localização das indústrias do setor e a média anual do total diário da irradiação solar no plano inclinado. Nesta, percebe-se que, com a exceção de um pequeno

grupo de indústrias no litoral catarinense, que se encontram em uma região de baixa irradiação, as demais indústrias do setor encontram-se pontos com valores de irradiação satisfatórios, com destaque para pontos nas regiões Nordeste e Centro-Oeste.

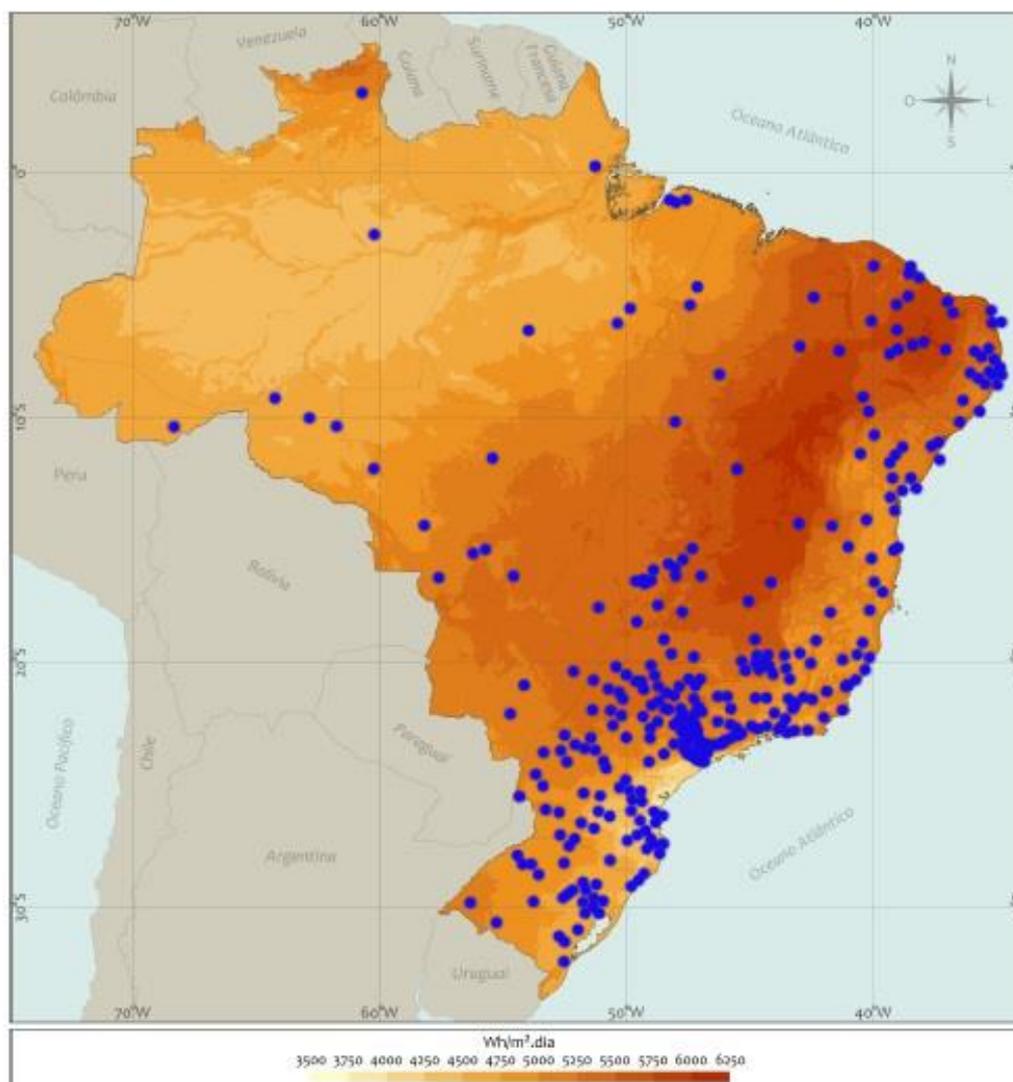


Figura 4.20 – Localidades com mais de dez indústrias do setor de papel e celulose em mapa que apresenta a média anual do total diário da irradiação solar no plano inclinado da latitude.[Adaptado de IBGE, 2015 e Pereira et al., 2017]

4.1.5.4 Indústria alimentícia: laticínios

Os processos usuais do setor de laticínios requerem temperaturas que podem chegar, em média, aos 180 °C, tornando conveniente o uso de coletores com concentradores. Assim, na Figura 4.21 apresenta-se a se a relação entre a localização das indústrias do setor e a média

anual do total diário da irradiação solar direta, a fim de avaliar a viabilidade do uso de coletores solares com concentradores.

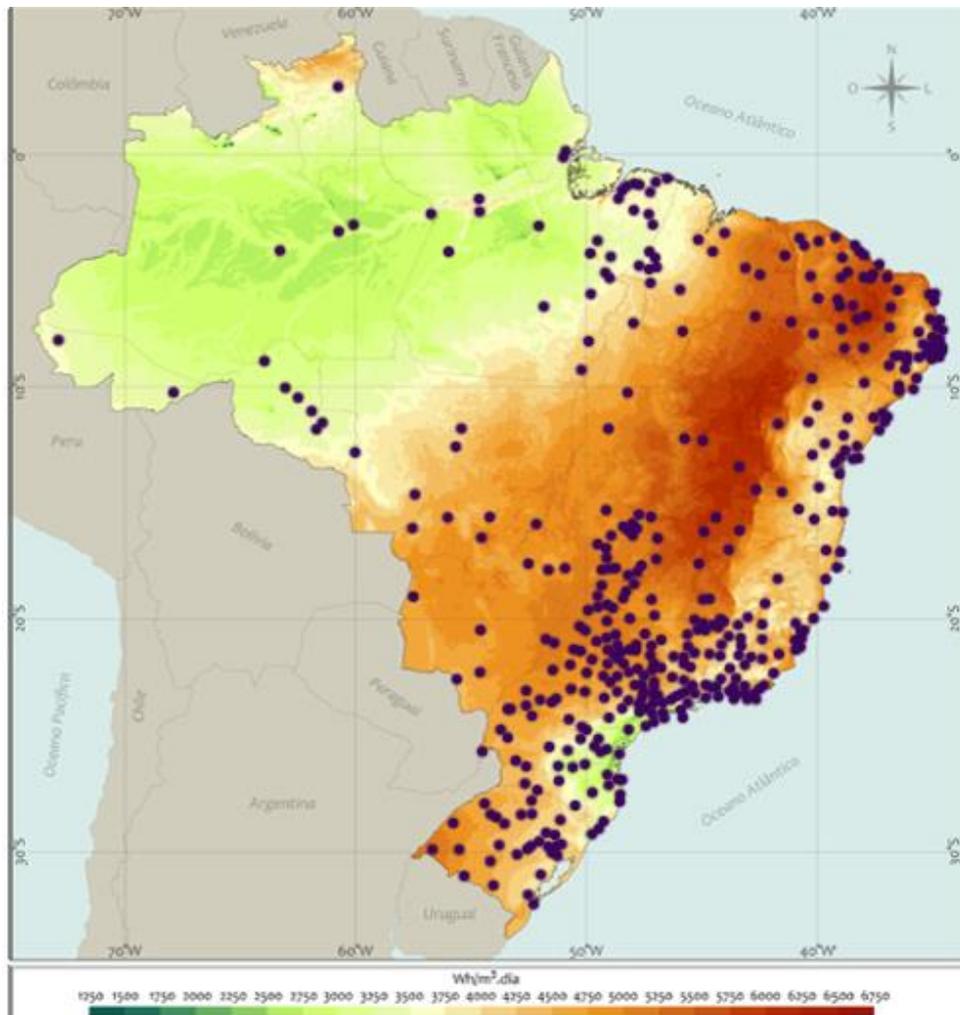


Figura 4.21 – Localidades com mais de dez indústrias do setor de laticínios em mapa que apresenta a média anual do total diário da irradiação solar direta horizontal.[Adaptado de IBGE, 2015 e Pereira et al., 2017]

Como observa-se na Figura 4.21, as indústrias localizadas na região Norte, e na faixa litorânea que, vai de Santa Catarina até São Paulo, possuem irradiação direta horizontal muito baixa, não sendo promissor o uso de coletores solares com concentradores. Entretanto, diversos pontos nas regiões Nordeste e Sudeste recebem valores elevados de irradiação, além de pontos no oeste do Rio Grande do Sul e do Paraná, e no estado de Minas Gerais.

Como visto anteriormente na Figura 4.14, cerca de um terço das instalações em operação, nesse setor, utilizam coletores estacionários do tipo FPC, destinados à limpeza e ao

pré-aquecimento de água de caldeira, bem como diretamente utilizados em processos de pasteurização.

Assim, para determinar a viabilidade do emprego de coletores estacionários, na Figura 4.22 é avaliada a relação entre a localização das indústrias do setor e a média anual do total diário da irradiação solar no plano inclinado. Pode-se observar na Figura 4.22 que, a quase totalidade das indústrias encontram-se em regiões com irradiação superior à média, o que possibilita o uso de coletores estacionários.

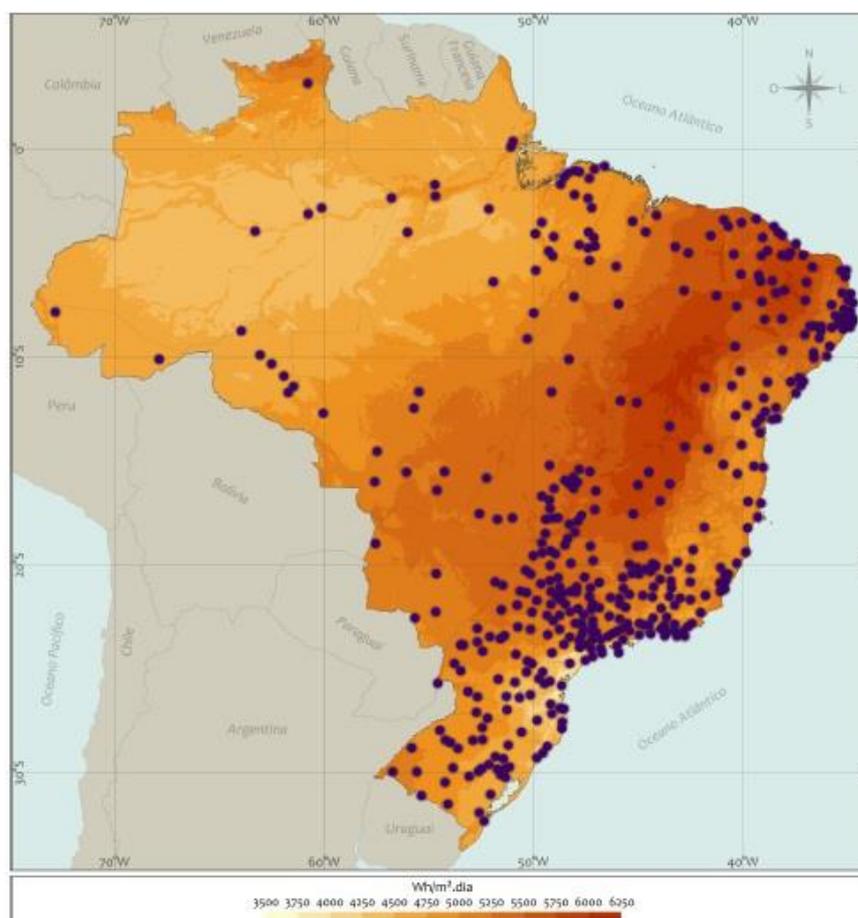


Figura 4.22 – Localidades com mais de dez indústrias do setor de laticínios em mapa que apresenta a média anual do total diário da irradiação solar no plano inclinado da latitude.[Adaptado de IBGE, 2015 e Pereira et al., 2017]

4.1.5.5 Indústria alimentícia: carne

O último setor avaliado é o de produtos à base de carne. Os processos deste setor demandam temperaturas de até 100 °C, sendo possível o uso de diversos tipos de coletores. Na

Figura 4.23 é apresentada a relação entre a localização das indústrias deste setor e a média anual do total diário da irradiação solar direta horizontal, utilizada para avaliar a viabilidade do uso de coletores concentradores.

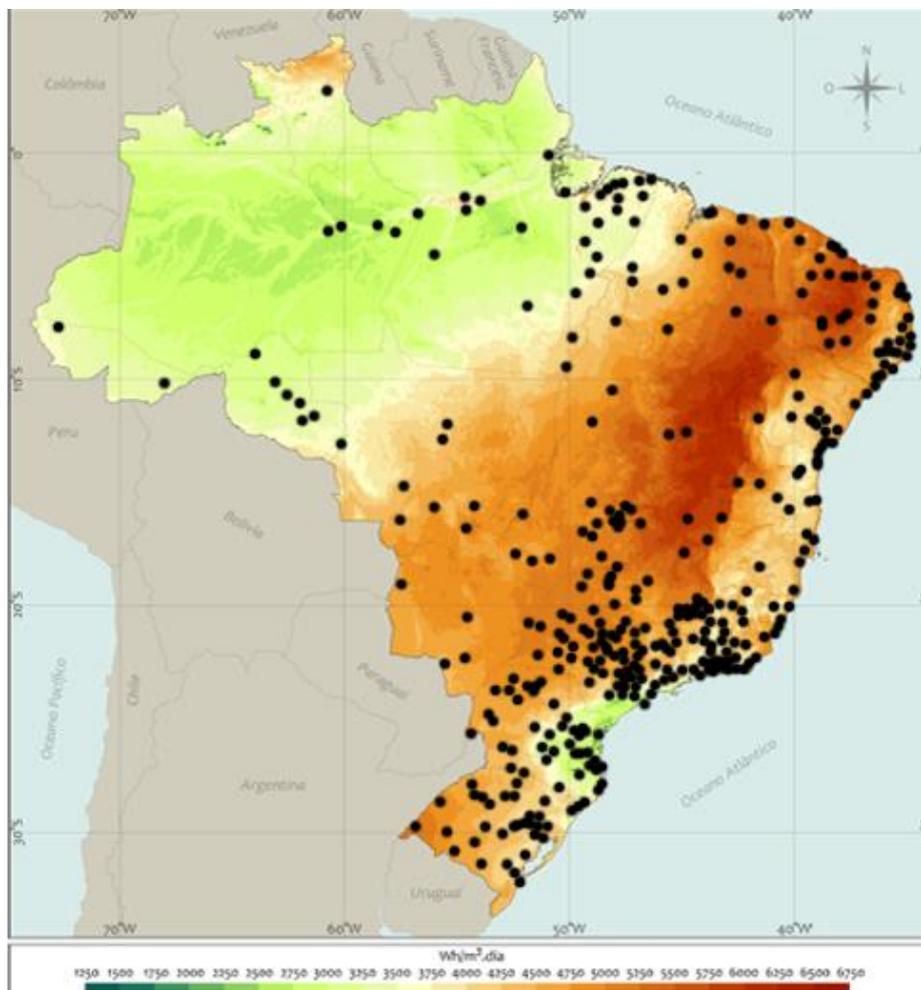


Figura 4.23 – Localidades com mais de dez indústrias do setor da carne em mapa que apresenta a média anual do total diário da irradiação solar direta horizontal.[Adaptado de IBGE, 2015 e Pereira et al., 2017]

A distribuição das indústrias do setor da carne é similar à distribuição do setor de laticínios, com indústrias na região Norte e no litoral de parte das regiões Sul e Sudeste, localizadas em áreas de baixa irradiação solar direta horizontal. Novamente, não é vantajoso o uso de coletores com concentradores. Por outro lado, pontos nas regiões Centro-Oeste e Nordeste apresentam valores de irradiação direta horizontal acima da média.

Visto que 80% das instalações do setor utilizam coletores estacionários, na Figura 4.24 avalia-se a relação entre a localização das indústrias do setor e a média anual do total diário da

irradiação solar no plano inclinado. Novamente, de forma similar ao setor de laticínios, pontos na região Norte e no litoral Sul e Sudeste estão localizados em regiões desfavoráveis ao uso de coletores solares. Contudo, grande parte das indústrias do setor estão localizadas em outras regiões, as quais recebem uma irradiação próxima ou superior à mínima recomendada para o uso de coletores estacionários por Suresh et al., 2017.



Figura 4.24 – Localidades com mais de dez indústrias do setor da carne em mapa que apresenta a média anual do total diário da irradiação solar no plano inclinado da latitude.[Adaptado de IBGE, 2015 e Pereira et al., 2017]

4.2 Discussão dos Resultados

O **setor de produtos químicos**, caracterizado por demandas térmicas a temperaturas elevadas, apresenta o segundo maior valor de investimento em ativos imobilizados. Esse fato indica uma tendência de maior gasto na modernização de seus processos. Consequentemente, isso que possibilitaria o uso de sistemas SHIP, com coletores concentradores, os quais requerem maior investimento inicial do que os coletores estacionários.

Assim, quando avaliada a irradiação solar direta nos estados com maior valor de PIB neste setor, destaca-se o estado de Minas Gerais. Nesse, quase todos os pontos de concentração de indústrias são em localidades com irradiação direta horizontal acima da mínima necessária (4.900 Wh/m^2). Este conjunto de indústrias encontra-se marcado na Figura 4.25.

Outro ponto a se observar é o estado do Ceará, também destacado na Figura 4.25. Esse apresenta altos valores de irradiação solar direta horizontal nas localidades com indústrias do setor. Entretanto, as mesmas pouco contribuem para o PIB industrial do mesmo. Irradiação essa que supera, inclusive, os valores tidos como ideais para a aplicação de coletores concentradores. Desta forma, quaisquer um desses estados possui potencial significativo para a implementação de sistemas SHIP utilizando coletores solares concentradores.

Por outro lado, o estado de São Paulo contribui com uma parcela muito mais significativa na composição do PIB industrial nacional. Ainda que a parcela do setor químico na composição do PIB do estado seja inferior. Porém, como se observa em vermelho na Figura 4.25, a concentração de indústrias se dá em uma região de baixa irradiação. Desta forma, as possíveis instalações de sistemas SHIP devem seguir a tendência observada em outras instalações no mundo. Isto é, devem fazer uso de coletores estacionários, os quais podem ser empregados no pré-aquecimento da água, que alimenta o gerador de vapor, reduzindo, assim, seu consumo.

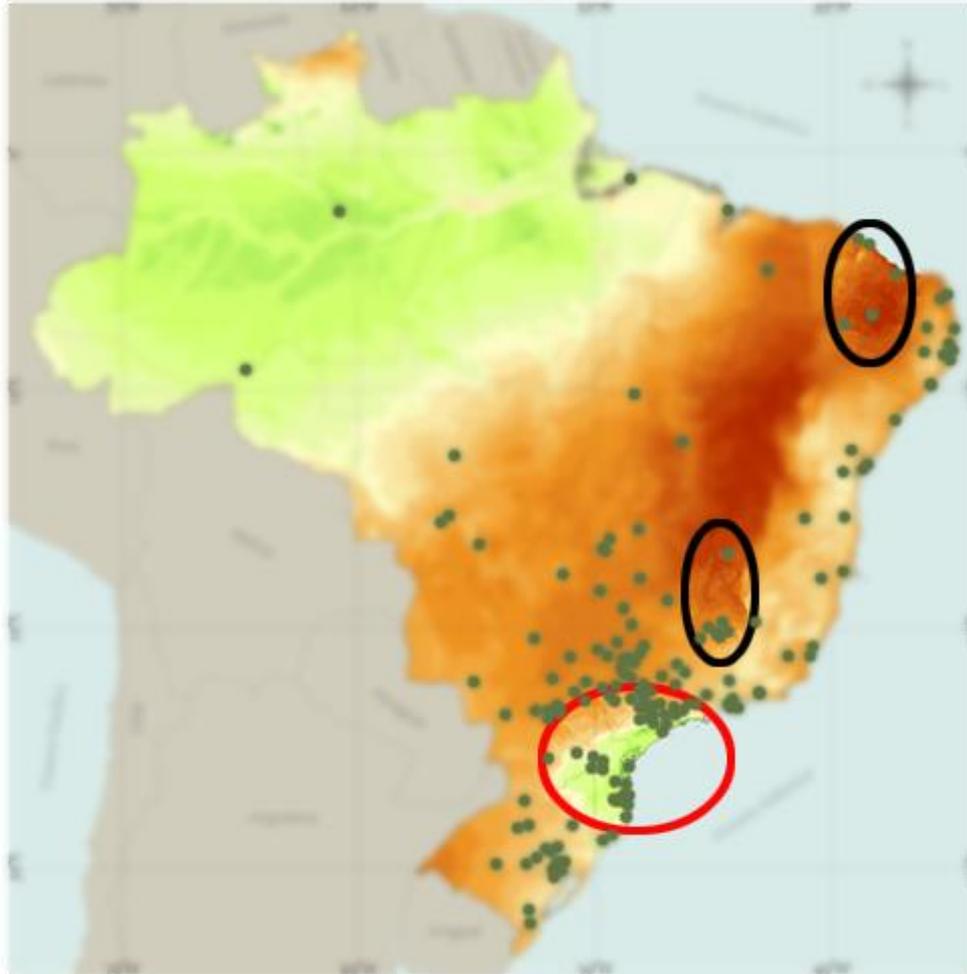


Figura 4.25 – Em destaque regiões de alta irradiação média diária horizontal anual (em preto) e baixa irradiação média diária horizontal anual (em vermelho) para o setor de produtos químicos. [Adaptado de IBGE, 2015 e Pereira et al., 2017]

O **setor têxtil**, que possui processos com demanda de calor a diferentes faixas de temperatura, apresenta baixa relevância econômica no cenário nacional, contribuindo com cerca de 1% do PIB industrial, e possui a menor quantidade de energia destinada à geração de calor. Porém, este calor é usualmente destinado a processos que utilizam imersões em água aquecida. Assim, frequentemente as instalações de SAS nesse setor são para pré-aquecimento da água para estes banhos.

No estado de Santa Catarina, esse setor apresenta a maior contribuição no seu PIB industrial. Contudo, na região onde se concentram essas indústrias, destacada em vermelho na Figura 4.26, observam-se baixos valores de irradiação solar direta horizontal. Desta forma, é

recomendável a utilização de coletores estacionários, que podem atender parte da demanda de calor, principalmente nos processos que envolvem banhos. Uma das vantagens seria a redução do consumo de gás natural pelo setor.

Já na região Nordeste, os estados da Paraíba e Rio Grande do Norte apresentam bons valores de irradiação solar direta, acima de 5.250 Wh/m^2 . Visto que este setor contribui com uma parcela relevante na composição do PIB destes estados, estas indústrias, circuladas em preto na Figura 4.26, seriam potenciais nichos de aplicação de coletores concentradores.

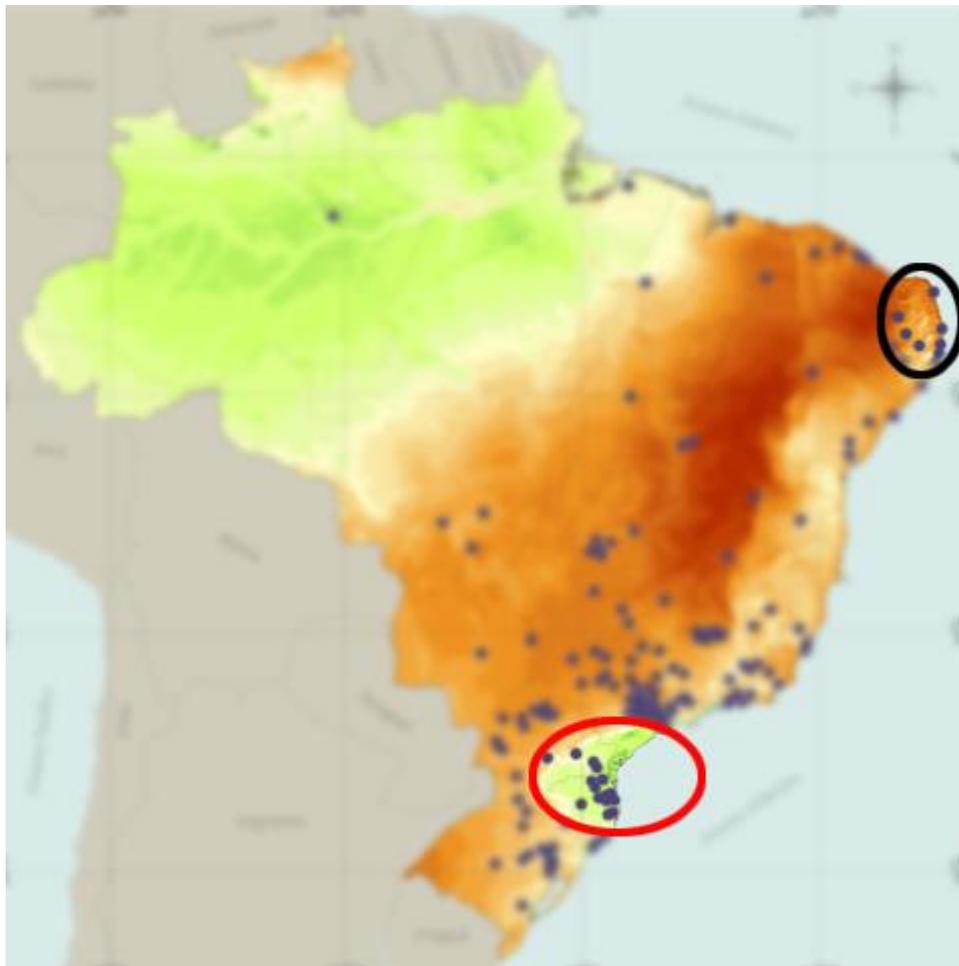


Figura 4.26 – Em destaque regiões de alta irradiação média diária horizontal anual (em preto) e baixa irradiação média diária horizontal anual (em vermelho) para o setor têxtil.[Adaptado de IBGE, 2015 e Pereira et al., 2017]

O setor de papel e celulose apresenta uma alta demanda por calor, com 84% da energia consumida pelo mesmo sendo destinada a esta finalidade. Entretanto, o processamento da

celulose, quando se utiliza madeira como matéria-prima, gera um subproduto, chamado lixívia. Esse produto pode ser utilizado como combustível, e é responsável por 51% do fornecimento de energia térmica para o setor.

Assim, as possibilidades de implementação de coletores solares neste setor, como pôde se observar na revisão bibliográfica, se dão, preferencialmente, em plantas industriais que utilizam material reciclável para a produção de papel. De acordo com a bibliografia consultada, até o presente momento, existem dados sobre a operação de apenas duas instalações que utilizam sistemas SHIP neste setor [IEA, 2018]. Uma utiliza coletores parabólicos em calha, PTC, e a outra usa refletores em disco parabólico, PDR, ambos coletores com concentradores.

Assim, avaliando a irradiação direta nas regiões com concentração de indústrias desse setor, percebe-se que indústrias localizadas nos estados do Ceará, Paraíba e Rio Grande do Norte apresentam valores elevados de irradiação, podendo fazer uso deste tipo de coletor. Estas indústrias, destacadas na Figura 4.27, recebem valores de irradiação próximos aos 5.500 Wh/m² considerados ideais para coletores concentradores [Suresh e Rao, 2017].

Porém, a contribuição deste setor no PIB industrial desses estados é inferior a 1%, tornando assim pouco atraentes incentivos para a adoção de SHIP nestas áreas. Entretanto, o setor tem o **maior investimento em ativo imobilizado dentre os setores avaliados**, de forma que a instalação deste tipo de SAS ainda é possível, mesmo sem incentivos governamentais.

O uso de coletores estacionários é indicado para o restante das indústrias, que se localizam em regiões que apresentam valores de irradiação no plano inclinado da latitude acima do mínimo recomendado de 4.900 Wh/m² para o uso de coletores estacionários. A exceção são as indústrias localizadas ao Leste dos estados de Santa Catarina e Paraná, bem como em pontos no litoral de São Paulo. Essas estão destacadas em vermelho na Figura 4.27.

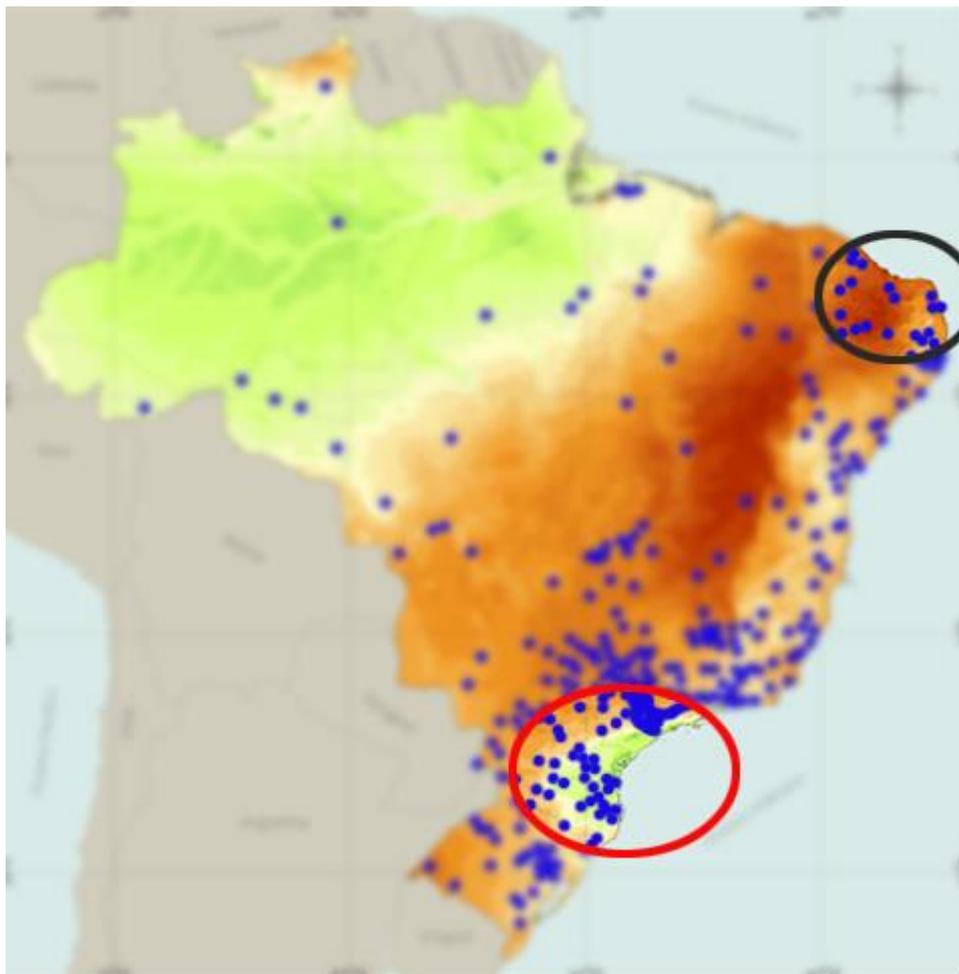


Figura 4.27 – Em destaque regiões de alta irradiação média diária horizontal anual (em preto) e baixa irradiação média diária horizontal anual (em vermelho) para o setor de papel e celulose. [Adaptado de IBGE, 2015 e Pereira et al., 2017]

O **setor de alimentos**, tem uma participação expressiva na composição do PIB industrial do país, sendo responsável por cerca de 10% do mesmo. Da mesma forma, quando avaliado seu impacto na economia dos estados, percebe-se uma predominância do setor nas regiões Sul e Centro-Oeste, bem como em alguns estados do Nordeste e Sudeste. Quanto à demanda energética do setor, cerca de 90% de seu consumo é destinado à geração de calor. Porém, a maior parcela da energia térmica necessária vem da queima do bagaço de cana, característica do setor sucroalcooleiro, que está fora do escopo deste estudo.

Assim, uma nova análise do consumo de combustíveis do setor, excluindo o bagaço de cana, mostra uma parcela de demanda energética destinada à geração de calor na faixa dos 60%.

Dentre os vários subsetores da indústria alimentícia, foram estudados apenas dois ao longo desse trabalho.

O primeiro a ser avaliado, **o setor de laticínios**, apresenta o maior número de instalações com sistemas SHIP em funcionamento, dentre os setores avaliados. As temperaturas requeridas pelos processos desse setor podem chegar até 180 °C. Logo, é necessário o uso de coletores concentradores para atender a estas temperaturas. Essa afirmativa é condizente com o que se observa nas instalações existentes, nas quais aproximadamente dois terços utilizam SHIP com coletores concentradores.

Entretanto, ao observar o mapa de irradiação direta e de localização das indústrias, percebe-se que apenas algumas localidades dos estados da Bahia, Ceará e Minas Gerais recebem irradiação solar direta horizontal elevada. Estes três estados encontram-se em destaque na Figura 4.28. Desses três estados, apenas em Minas Gerais o setor alimentício possui impacto na economia, sendo relevante a sua participação tanto no PIB estadual, quanto no PIB nacional. Outras regiões com alta participação do setor alimentício em seu PIB, como a região Centro-Oeste, por exemplo, apresentam melhor potencial para a instalação de sistemas SHIP.

Por outro lado, é importante observar que o setor de laticínios apresenta o segundo menor valor de investimento em ativos imobilizados. Isso significa que há uma menor tendência em gastos com novos equipamentos. Desta forma, podem ser utilizados, como alternativa menos dispendiosa, coletores estacionários que são capazes de atender parte dos processos inerentes a esse setor.



Figura 4.28 – Em destaque regiões de alta irradiação média diária anual no plano da latitude (em preto) para o setor de laticínios. [Adaptado de IBGE, 2015 e Pereira et al., 2017]

Por fim, **o setor de produtos à base de carne**, outro subsetor alimentício, foi avaliado. O setor conta com 15 instalações com dados disponíveis, sendo que 12 delas utilizam coletores estacionários, fato justificado pelas temperaturas de seus processos, que não ultrapassam os 100 °C.

A distribuição das indústrias deste setor se assemelha à distribuição do setor de laticínios. Porém, as regiões promissoras ao uso de sistemas SHIP, com coletores estacionários, encontram-se nos estados de São Paulo, Minas Gerais, Rio Grande do Sul, Pernambuco e Goiás.

A instalação de coletores estacionários é favorável no caso de São Paulo, Minas Gerais e Rio Grande do Sul, visto que esses estados figuram entre os maiores PIB do setor. Nesses estados, a maior parte das indústrias está localizada em regiões com irradiação próxima dos 5.000 Wh/m², valor considerado bom para a utilização de coletores estacionários [Suresh e Rao, 2017]. Como pode se observar, nas regiões marcadas na Figura 4.29, isso se aplica às principais

concentrações de indústrias nesses estados, com a exceção de pontos localizados a Leste do Rio Grande do Sul e na região litorânea de São Paulo.

Já os estados de Goiás e Pernambuco possuem uma baixa contribuição ao PIB industrial nacional. Ainda assim, são o sexto e oitavo maior PIB do setor alimentício, respectivamente. Pela Figura 4.29 percebe-se que as indústrias localizadas nesses estados recebem valores de irradiação superiores às anteriormente citadas, de forma que a instalação de coletores nesses estados se mostra viável.

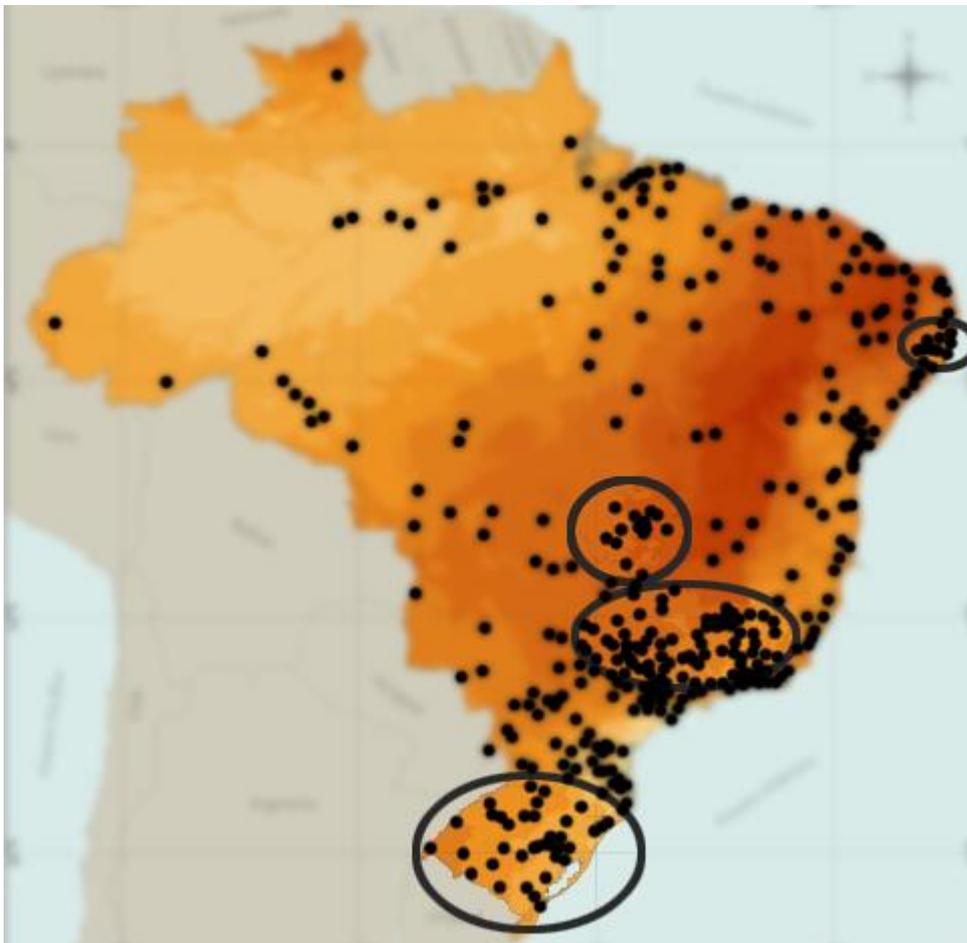


Figura 4.29 – Em destaque regiões de alta irradiação média diária anual no plano da latitude (em preto) para o setor de carnes. [Adaptado de IBGE, 2015 e Pereira et al., 2017]

A Tabela 4.4 destaca as melhores oportunidades observadas. Nela, para cada setor. É apontado o tipo de coletor recomendável, entre coletores estacionários e concentradores, para

as UFs que apresentam valores de irradiação favorável à adoção dos mesmos. Também se apresenta, na última coluna, o valor do PIB gerado por este setor para a UF avaliada.

Tabela 4.4 – Principais oportunidades observadas, apontando para cada setor avaliado: o tipo de coletor a aplicar, a irradiação na UF e o valor do PIB gerado pelo setor na mesma.

Setor	Tipo de coletor recomendado	UFs de irradiação favorável	PIB do setor na UF
Químico	Concentrador	Minas Gerais (4.900 Wh/m ²)	R\$ 4,5 bilhões
	Concentrador	Ceará (5.750 Wh/m ²)	R\$ 0,42 bilhões
	Estacionário	São Paulo (5.000 Wh/m ²)	R\$ 29,17 bilhões
Têxtil	Estacionário	Santa Catarina (4.500 Wh/m ²)	R\$ 2,95 bilhões
	Concentrador	Paraíba (5.250 Wh/m ²)	R\$ 0,26 bilhões
	Concentrador	Rio Grande do Norte (5.250 Wh/m ²)	R\$ 0,22 bilhões
Papel e Celulose	Concentrador	Ceará (5.500 Wh/m ²)	R\$ 0,18 bilhões
	Concentrador	Paraíba (5.500 Wh/m ²)	R\$ 0,02 bilhões
	Concentrador	Rio Grande do Norte (5.500 Wh/m ²)	R\$ 0,01 bilhões
Laticínios	Concentrador	Bahia (5.500 Wh/m ²)	R\$ 2,92 bilhões ²
	Concentrador	Ceará (5.500 Wh/m ²)	R\$ 2,1 bilhões ²
	Concentrador	Minas Gerais (5.500 Wh/m ²)	R\$ 15,03 bilhões ²
	Estacionário	Rio Grande do Sul (4.750 Wh/m ²)	R\$ 12,8 bilhões ²
	Estacionário	São Paulo (4.750 Wh/m ²)	R\$ 48 bilhões ²
Carne	Estacionário	Minas Gerais (5.000 Wh/m ²)	R\$ 15,03 bilhões ²
	Estacionário	Rio Grande do Sul (4.750 Wh/m ²)	R\$ 12,8 bilhões ²
	Estacionário	São Paulo (5.000 Wh/m ²)	R\$ 48 bilhões ²

² Não foram obtidos valores de PIB dos subsetores de laticínios e carne, sendo então utilizado para fins de comparação o PIB do setor alimentício.

5 CONCLUSÕES

Uma análise qualitativa do potencial de utilização de sistemas SHIP, através do uso coletores solares, por determinados setores da indústria foi realizada. A seleção dos setores se deu com base em uma revisão sistemática da literatura especializada, no consumo de energia, na porcentagem de energia térmica destinada à geração de calor, e seu impacto na economia nacional e regional.

Através da investigação das instalações existentes no mundo, percebe-se um crescimento no uso de coletores concentradores, nos sistemas SHIP, especialmente em indústrias que possuem uma demanda de calor a temperaturas elevadas. Entretanto, a simplicidade de integração de coletores de placa plana, FPC, principalmente aplicados no pré-aquecimento da água que abastece a caldeira, faz com que este coletor seja amplamente utilizado.

A avaliação do setor químico mostrou a viabilidade da utilização de sistemas SHIP, com coletores concentradores, na região nordeste do país. Nessa região, além de altos valores de irradiação normal direta horizontal, a contribuição para a economia local torna o setor relevante. Foi observado ainda que, nos estados de São Paulo e Rio Grande do Sul seria possível a utilização de coletores estacionários pelo setor.

Porém, para o uso de coletores concentradores as condições não são favoráveis. Isso se deve principalmente ao fato de as indústrias localizadas em áreas de irradiação favorável apresentarem baixo retorno financeiro. Ou seja, estas indústrias pouco contribuem para a composição do PIB da respectiva UF, ou essa pouco contribui na composição do PIB nacional. Assim, mesmo o setor possuindo altos investimentos em ativo imobilizado, o uso de coletores concentradores dificilmente seria adotado.

A indústria têxtil apresentou o menor potencial dentre os setores avaliados, visto que possui baixa relevância no PIB nacional. Não obstante, o estado no qual esse setor mais contribui na composição setorial do PIB, Santa Catarina, possui baixa irradiação média anual, tanto no plano inclinado da latitude, quanto direta horizontal. Em algumas regiões ainda é possível a aplicação de coletores estacionários, visto que essas apresentam valores de irradiação média anual suficientes. O uso desse tipo de coletor, voltado para o pré-aquecimento de água, é prática comum nas instalações existentes neste setor em outros locais.

O setor de papel e celulose tem 84% de seu consumo energético associado à geração de calor, o que, aliado ao fato de possuir o maior valor em investimentos em ativos imobilizados, deveria dar ao setor um grande potencial para a utilização de sistemas SHIP. Entretanto, o processo produtivo do papel gera um subproduto, a lixívia, que é utilizada como combustível para queima, suprimindo cerca de 50% das necessidades energéticas do setor. Assim, a aplicação de coletores solares se torna limitada, como pode se perceber no baixo número de instalações no setor existentes no mundo. O uso de sistemas SHIP fica restrito, então, às plantas industriais que operam com fibras recicladas, visto que essas não produzem a lixívia.

O setor alimentício possui a maior participação no PIB nacional dentre os setores avaliados neste estudo, sendo também o setor de maior impacto na economia de diversos estados. A demanda de calor deste setor é também a mais elevada. Entretanto, foi desconsiderado o uso do bagaço de cana como combustível, visto que este é característico da indústria sucroalcooleira, que não faz parte do escopo deste trabalho.

Mesmo com esta consideração, a demanda de calor é proporcional a mais de 60% do consumo de energia do setor. Dentre os vários subsetores que compõem esse setor, dois foram avaliados: o de laticínios e o de produtos à base de carne. A distribuição espacial das indústrias é semelhante nos dois subsetores. Entretanto as temperaturas necessárias aos processos do setor de laticínios são superiores ao setor de produtos à base de carne.

O setor de laticínios apresenta o maior número de indústrias com sistemas SHIP instalados no mundo, dentre os setores estudados, sendo que dois terços desses sistemas utilizam coletores concentradores. Entretanto, como pôde-se observar nos mapas analisados, poucas localidades apresentam valores de irradiação direta satisfatórios. Como é o caso de alguns pontos na região Nordeste e no estado de Minas Gerais.

Este fato, aliado ao baixo investimento em ativos imobilizados no setor, torna atraente o uso de coletores estacionários, visto que estes podem ainda atender às demandas de temperaturas de alguns processos. Por outro lado, os valores de irradiação no plano inclinado na latitude, em estados cuja participação do setor no PIB industrial é elevada, mostram-se acima da média. Essa característica permite o uso de coletores mais simples, como os coletores de placa plana e de tubo evacuado.

Por fim, no setor de carnes a demanda de temperaturas é inferior à demanda de temperatura do setor de laticínios. Desta forma, instalações futuras no país podem seguir a tendência dos sistemas já em funcionamento no mundo, fazendo uso de coletores estacionários.

Embora, indústrias localizadas na região Nordeste apresentem valores altos de irradiação direta horizontal e possam utilizar coletores concentradores.

Entretanto, avaliando a participação na composição do PIB nacional, os estados de São Paulo, Minas Gerais e Rio Grande do Sul apresentam tanto potencial econômico quanto valores de irradiação solar no plano inclinado da latitude suficientes para a implementação de coletores mais simples em sistemas SHIP.

Com este estudo foi possível determinar os setores com potencial para implementação de sistemas SHIP. Também se identificou as regiões, com irradiação favorável, nas quais estas indústrias estão localizadas, bem como seu impacto na economia do país. Desta forma, os resultados obtidos são positivos, visto que proporcionaram a identificação de potenciais aplicações, evidenciando as regiões, setores, processos, e tipos de coletores a se utilizar.

Por fim, cabe salientar que, ao longo da pesquisa realizada para a elaboração deste trabalho, não foram encontrados estudos sobre a avaliação do potencial de utilização de sistemas SHIP por indústrias no país. Assim, esta dissertação, de caráter inédito, pode servir como base teórica para futuros estudos de caso, por exemplo. Ou seja, auxiliando na seleção de setores, locais e processos.

5.1 Sugestões de Trabalhos Futuros

Como sugestões de trabalhos futuros acerca do tema, propõem-se estender a pesquisa a outros setores, além dos avaliados neste estudo. Adicionalmente, pode-se aprofundar a pesquisa em um setor específico, efetuando simulações de instalações em uma indústria, da qual se tenha a demanda específica de calor. Também pode-se propor a simulação um sistema de geração de vapor genérico, aplicável a diferentes setores.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aktaş, M., Şevik, S., Amini, A. e Khanlari, A. Analysis of drying of melon in a solar-heat recovery assisted infrared dryer. **Solar Energy**, vol. 137, p. 500–515, 2016.

Allouhi, A., Agrouaz, Y., Benzakour Amine, M., Rehman, S., Buker, M. S. 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.

Almeida, T. E. G. **Energia termossolar como alternativa na geração de vapor e água quente no setor agroindustrial**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Florianópolis, 2018.

Almomani, F., Bhosale, R., Kumar, A. e Khraisheh, M. Potential use of solar photocatalytic oxidation in removing emerging pharmaceuticals from wastewater: A pilot plant study. **Solar Energy**, vol. 172, p. 128–140, 2018.

Atkins, M. J., Walmsley, M. R. W. e Morrison, A. S. Integration of solar thermal for improved energy efficiency in low-temperature-pinch industrial processes. **Energy**, vol. 35, n. 5, p. 1867–1873, 2010.

Baniassadi, A., Momen, M., Amidpour, M. e Pourali, O. Modeling and design of solar heat integration in process industries with heat storage. **Journal of Cleaner Production**, vol. 170, p. 522–534, 2018.

Bellos, E., Korres, D., Tzivanidis, C. e Antonopoulos, K. A. Design, simulation and optimization of a compound parabolic collector. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, vol. 16, p. 53–63, 2016.

Berger, M., Meyer-Grünefeldt, M., Krüger, D., Hennecke, K., Mokhtar, M. e Zahler, C. First Year of Operational Experience with a Solar Process Steam system for a Pharmaceutical Company in Jordan. **Energy Procedia**, vol. 91, p. 591–600, 2016.

Biglia, A., Fabrizio, E., Ferrara, M., Gay, P. e Aimonino, D. R. Performance assessment of a multi-energy system for a food industry. **Energy Procedia**, vol. 82, p. 540–545, 2015.

Buscemi, A., Panno, D., Ciulla, G., Beccali, M. e Lo Brano, V. Concrete thermal energy storage for linear Fresnel collectors: Exploiting the South Mediterranean's solar potential for agri-food processes. **Energy Conversion and Management**, vol. 166, n. May, p. 719–734, 2018.

Calderoni, M., Aprile, M., Moretta, S., Aidonis, A. e Motta, M. Solar thermal plants for industrial process heat in Tunisia: Economic feasibility analysis and ideas for a new policy. **Energy Procedia**, vol. 30, p. 1390–1400, 2012.

CNI, Confederação Nacional da Indústria. **Perfil da Indústria - Composição Setorial**. 2018. http://perfildaindustria.portaldaindustria.com.br/composicao_setorial, 2018. Acesso em: 24-09-2018.

Devanarayanan, K. e Kalidasa Murugavel, K. Integrated collector storage solar water heater with compound parabolic concentrator – development and progress. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, vol. 39, p. 51–64, 2014.

Duffie, J. A. e Beckman, W. A. **Solar Engineering of Thermal Processes**. 4th Edition. New Jersey, 2013, 928 p.

EIA, U.S. Energy Information Administration. **International Energy Outlook**, 2017. <https://www.eia.gov/outlooks/ieo/>. Acesso em: 25-09-2018

El-Beltagy, A., Gamea, G. R. e Essa, A. H. A. Solar drying characteristics of strawberry. **Journal of Food Engineering**, vol. 78, n. 2, p. 456–464, 2007.

EPE, Empresa de Pesquisa Energética. **BEN - Balanço energético Nacional 2018: Ano base 2017**. Rio de Janeiro. EPE, 2018, 292 p.

Essalhi, H., Benchrifa, M., Tadili, R. e Bargach, M. N. Experimental and theoretical analysis of drying grapes under an indirect solar dryer and in open sun. **Innovative Food Science and Emerging Technologies**, [s. l.], 2018.

Expósito, A. J., Durán, A., Monteagudo, J. M. e Acevedo, A. Solar photo-degradation of a pharmaceutical wastewater effluent in a semi-industrial autonomous plant. **Chemosphere**, vol. 150, p. 254–257, 2016.

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**, [s. l.], vol. 82, n. August 2017, p. 2270–2286, 2018. a.

Farjana, S. H., Huda, N., Mahmud, M. A. P. e Saidur, R. Solar industrial process heating systems in operation – Current SHIP plants and future prospects in Australia.

Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 91, p. 409–419, 2018. b.

Frein, A., Motta, M., Berger, M. e Zahler, C. Solar DSG plant for pharmaceutical industry in Jordan: Modelling, monitoring and optimization. **Solar Energy**, vol. 173, p. 362–376, 2018.

Frein, A., Calderoni, M. e Motta, M. Solar Thermal Plant Integration into an Industrial Process. **Energy Procedia**, vol. 48, p. 1152–1163, 2014.

Haagen, M., Zahler, C., Zimmermann, E. e Al-Najami, M. M. R. Solar Process Steam for Pharmaceutical Industry in Jordan. **Energy Procedia**, vol. 70, p. 621–625, 2015.

Hafez, A. Z., Attia, A. M., Eltwab, H. S., ElKousy, A. O., Afifi, A. A., Abdelhamid, A. G., Abdelqader, A. N., Fateen, S.-E. K., El-Metwally, K. A., Soliman, A. e Ismail, I. M. **Design analysis of solar parabolic trough thermal collectors. Renewable and Sustainable Energy Reviews**, vol. 82, p. 1215–1260, 2018.

Hasanbeigi, A. e Price, L. A review of energy use and energy efficiency technologies for the textile industry. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, vol. 16, n. 6, p. 3648–3665, 2012.

Horta, P., Brunner, C., Kramer, K. e Frank, E. IEA/SHC T49 Activities on Process Heat Collectors: Available Technologies, Technical-Economic Comparison Tools, Operation and Standardization Recommendations. **ENERGY PROCEDIA**, 2016.

Husham Abdulmalek, S., Khalaji Assadi, M., Al-Kayiem, H. H. e Gitan, A. A. A comparative analysis on the uniformity enhancement methods of solar thermal drying. **Energy**, vol. 148, p. 1103–1115, 2018.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Portal de Mapas**. 2015. <https://portaldemapas.ibge.gov.br/>. Acesso em: 23-04-2018.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Pesquisa Industrial - Empresa 2016.**, vol. 35, 2016.

IEA, International Energy Agency. Renewables information: Overview 2017. **IEA Statistics**, p. 8, 2017.

IEA, International Energy Agency. **Solar Thermal Plants Database**. 2018.
<http://ship-plants.info/solar-thermal-plants>. Acesso em: 4-10-2018.

Jakkamputi, L. P. e Mandapati, M. J. K. Improving the performance of jaggery making unit using solar energy. **Perspectives in Science**, vol. 8, p. 146–150, 2016.

Je basingh, V. K. e Herbert, G. M. J. A review of solar parabolic trough collector. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, vol. 54, p. 1085–1091, 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.

Kalogirou, S. A. **Solar Energy Engineering: Processes and Systems**. California, 2014, 756 p.

Karagiorgas, M., Botzios, A. e Tsoutsos, T. Industrial solar thermal applications in Greece: economic evaluation, quality requirements and case studies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, vol. 5, n. 2, p. 157–173, 2001.

Kempener, R., Burch, J., Brunner, C., Navntoft, C. e Mugnier, D. Solar heat for industrial processes: Technology Brief. **IEA-ETSAP & IRENA Technology Brief E21**, vol. 17, n. January, p. 216–260, 2015.

Khan, M. M. A., Ibrahim, N. I., Mahbubul, I. M., Muhammad. Ali, H., Saidur, R. e Al-Sulaiman, F. A. Evaluation of solar collector designs with integrated latent heat thermal energy storage: A review. **Solar Energy**, vol. 166, p. 334–350, 2018.

Kituu, G. M., Shitanda, D., Kanali, C. L., Mailutha, J. T., Njoroge, C. K., Wainaina, J. K. e Silayo, V. K. Thin layer drying model for simulating the drying of Tilapia fish (*Oreochromis niloticus*) in a solar tunnel dryer. **Journal of Food Engineering**, vol. 98, n. 3, p. 325–331, 2010.

Kylili, A., Fokaides, P. A., Ioannides, A. e Kalogirou, S. Environmental assessment of solar thermal systems for the industrial sector. **Journal of Cleaner Production**, vol. 176, p. 99–109, 2018.

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, n. 7, p. 5121–5130, 2012.

Martínez, C. I. P. Energy use and energy efficiency development in the German and Colombian textile industries. **Energy for Sustainable Development**, vol. 14, n. 2, p. 94–103, 2010.

Mekhilef, S., Saidur, R. e Safari, A. A review on solar energy use in industries. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, vol. 15, n. 4, p. 1777–1790, 2011.

Müller, H., Brandmayr, S. e Zörner, W. Development of an evaluation methodology for the potential of solar-thermal energy use in the food industry. In: **ENERGY PROCEDIA** 2014, Elsevier, 2014.

Muneer, T., Asif, M., Cizmecioglu, Z. e Ozturk, H. K. Prospects for solar water heating within Turkish textile industry. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, vol. 12, n. 3, p. 807–823, 2008.

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 Reviews**, vol. 92, n. August 2017, p. 1–8, 2018.

Pandey, K. M. e Chaurasiya, R. A review on analysis and development of solar flat plate collector. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, vol. 67, p. 641–650, 2017.

Pereira, E. B., Martins, F. R., Gonçalves, A.R., Costa, R.S., de Lima, F.J.L., Rütther, R., de Abreu, S.L., Tiepolo, G.M., Pereira, S.V. e de Souza, J.G.. **Atlas Brasileiro da Energia Solar**. 2ed. São José dos Campos: INPE, 2017, 88 p.

Pereira, E. M. D. Uso Industrial da energia solar térmica : desafios para o mercado brasileiro . Projeto Solar Payback Consumo Final de Energia no Setor Industrial - BR. **VII CBENS**, [s. l.], 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.

Pietruschka, D., Hassine, I. B., Cotrado, M., Fedrizzi, R. e Cozzini, M. Large Scale Solar Process Heat Systems -planning, Realization and System Operation. **Energy Procedia**, vol. 91, p. 638–649, 2016.

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.

Quijera, J. A., Alriols, M. G. e Labidi, J. Integration of a solar thermal system in a dairy process. **Renewable Energy**, vol. 36, n. 6, p. 1843–1853, 2011.

Quijera, J. A., Alriols, M. G. e Labidi, J. Integration of a solar thermal system in canned fish factory. **Applied Thermal Engineering**, vol. 70, n. 2, p. 1062–1072, 2014.

Sabiha, M. A., Saidur, R., Mekhilef, S. e Mahian, O. Progress and latest developments of evacuated tube solar collectors. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, vol. 51, p. 1038–1054, 2015.

Şevik, S. Design, experimental investigation and analysis of a solar drying system. **Energy Conversion and Management**, vol. 68, p. 227–234, 2013.

Sharma, A. K., Sharma, C., Mullick, S. C. e Kandpal, T. C. Potential of Solar Energy Utilization for Process Heating in Paper Industry in India: A Preliminary Assessment. **Energy Procedia**, vol. 79, p. 284–289, 2015.

Sharma, A. K., Sharma, C., Mullick, S. C. e Kandpal, T. C. Carbon mitigation potential of solar industrial process heating: Paper industry in India. **Journal of Cleaner Production**, vol. 112, p. 1683–1691, 2016.

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**, vol. 140, p. 714–724, 2017. a.

Sharma, A. K., Sharma, C., Mullick, S. C. e Kandpal, T. C. Solar industrial process heating: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, vol. 78, p. 124–137, 2017. b.

Shukla, R., Sumathy, K., Erickson, P. e Gong, J. Recent advances in the solar water heating systems: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, vol. 19, p. 173–190, 2013.

Suresh, N. S. e 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.

Tobergte, D. R. e Curtis, S. Potential for Solar Heat in Industrial Processes. **The International Renewable Energy Agency**, vol. 53, n. 9, p. 1689–1699, 2013.

Vieira de Souza, L. E. e Gilmanova Cavalcante, A. M. Concentrated Solar Power deployment in emerging economies: The cases of China and Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, vol. 72, n. November 2016, p. 1094–1103, 2017.

Walmsley, T. G., Walmsley, M. R. W., Tarighaleslami, A. H., Atkins, M. J. e Neale, J. R. Integration options for solar thermal with low temperature industrial heat recovery loops. **Energy**, vol. 90, p. 113–121, 2015.

Weiss, W. e Spörk-Dür, M. Solar Heat Worldwide: Global Market Development and Trends in 2017. **The International Renewable Energy Agency**, [s. l.], 2017.

APÊNDICE A - Indústrias com instalações de SHIP no mundo

A.1 Indústria alimentícia: carne

Tabela A.1 – Indústrias do setor de carne com SHIP. [Adaptado de IEA, 2018]

Empresa	País	Tipo coletor	Área [m²]	Ano instalação	Processo	Temperatura [°C]
Carnes La Laguna slaughterhouse	México	ETC	99	2009	Limpeza	55-85
Carnes Muma	México	ETC	72	2009	Limpeza	50-90
ProCarne Slaughterhouse B	México	ETC	96	2006	Limpeza	55-90
Poultry Processing Malaysia	Malásia	ETC	181	2017	pré aquecimento de caldeira	80-90
Sukarne Slaughterhouse	México	ETC	195	2009	Limpeza	60-90
Adam's Farm slaughterhouse	EUA	FPC	297	2013	Limpeza	N.I.
Bonaprime Slaughterhouse	México	FPC	65	2015	pré aquecimento de caldeira	65-85
Carnes Selectas de México	México	FPC	175	2017	pré aquecimento de caldeira	50-90
Fleischwaren Berger	Austria	FPC	1067	2013	pré aquecimento de caldeira	30-95
Montesano	Espanha	FPC	252	2011	Limpeza	40-45
ProCarne Slaughterhouse A	México	FPC	110	2013	Limpeza	60-80
Sukarne Slaughterhouse - Mexicali	México	FPC	100	2009	pré aquecimento de caldeira	N.I.*
Carnes Selectas de Sonora	México	PTC	89,5	2015	Limpeza	20-70
Grupo Mirasol de Occidente	México	PTC	396	2017	pré aquecimento de caldeira	20-90
Rastro Garibay	México	PTC	250	2015	calor de processo	20-95

* N.I.= Não Informado

A.2 Setor alimentício: laticínios

Tabela A.2 - Indústrias do setor de laticínios com SHIP. Adaptado de: [IEA, 2018]

Empresa	País	Tipo coletor	Área [m²]	Ano instalação	Uso energia solar	Temperatura [°C]
B.G. Chitale	Índia	PDR	320	2009	pasteurização	150
Mahananda Dairy	Índia	PDR	160	2006	pasteurização	120
Salem district cooperative	Índia	CPC	338	2014	pré aquecimento caldeira	95
Mother Dairy	Índia	PDR	1520	2016	limpeza	70-90
Santa Anita Dairy	México	ETC	68	2006	limpeza	50-80
Alpino S.A.	Grécia	FPC	740	1999	pré aquecimento caldeira	20 - 70
Battenkill valley creamery	EUA	FPC	53	N.I.	pré aquecimento caldeira	N.I.
Bonilat Dairy	França	FPC	1500	2014	limpeza	80
Dausa Milk	Índia	FPC	110	2010	limpeza	75-85
HP Dairy State	Índia	FPC	120	2013	pré aquecimento caldeira	N.I.
Mandrekas S.A.	Grécia	FPC	170	1993	calor de processo	40-45
Milma dairy	Índia	FPC	1440	2003	pasteurização	N.I.
Panchmahal Dairy	Índia	FPC	472	N.I.	pré aquecimento caldeira	N.I.
Perfetti van Melle	Holanda	FPC	2400	1998	pré aquecimento caldeira	N.I.
Grombalia Dairy	Tunísia	LFR	120	N.I.	refrigeração	N.I.
Nuova Sarda	Itália	LFR	995	2015	Geração de vapor	200
COPAG SHIP	Marrocos	PTC	110	2015	pré aquecimento caldeira	80-90
Centro Lechero Cooperativo de los Altos	México	PTC	422	2015	limpeza	19-92
Crema S.A.	Suíça	PTC	581	2013	calor de processo	125-170
Durango Dairy Company	México	PTC	265,7	2013	pré aquecimento caldeira	20-95
Emmi Dairy Saignelégier	Suíça	PTC	627	2012	Geração de vapor	140-180
Enfriadora Jaliciense	México	PTC	250	2014	calor de processo	20-90

Empresa	País	Tipo coletor	Área [m²]	Ano instalação	Uso energia solar	Temperatura [°C]
Foukaki Farm	Grécia	PTC	10	N.I.	pré aquecimento caldeira	N.I.
La Trinidad	México	PTC	226,8	2017	pré aquecimento caldeira	20-90
Lacto Produtos El Indio	México	PTC	401	2012	calor de processo	20-95
Laiterie Chagnon	Canadá	PTC	82	2011	pré aquecimento caldeira	80-90
Lesa Dairy	Suíça	PTC	115	2011	calor de processo	N.I.
Lácteos Mojica	México	PTC	132	2016	pré aquecimento caldeira	20-95
Matatlan Dairy	México	PTC	66	2013	calor de processo	80-100
Nestle	México	PTC	460	2014	pré aquecimento caldeira	80-95
Nestle	México	PTC	1327,6	2014	pré aquecimento caldeira	80-95
Quesera Lacteos Ticoy	México	PTC	250	2015	pasteurização	20-95
Quesos La Doñita	México	PTC	66	2014	pasteurização	60-95
Lechera Guadalajara	México	PTC	1641	2015	pasteurização	70-95

N.I.= Não Informado

A.3 Setor de Papel e Celulose

Tabela A.3 - Industrias do setor de papel e celulose com SHIP. Adaptado de: [IEA, 2018]

Empresa	País	Tipo coletor	Área [m²]	Ano instalação	Uso energia solar	Temperatura [°C]
B.S. Paper Mill	Índia	Disco	160	2011	calor de processo	90-98
Parc Solaire	Canadá	PTC	1490	2014	pré aquecimento água de caldeira	120-140

A.4 Setor Químico

Tabela A.4 - Indústrias do setor químico com SHIP. Adaptado de: [IEA, 2018]

Empresa	País	Tipo coletor	Área [m²]	Ano instalação	Uso energia solar	Temperatura [°C]
L'Oreal Pune	Índia	FPC	640	N.I.	Limpeza	55
BASF Mexico	México	FPC	30	2017	pré aquecimento caldeira	60-80
MAPAG	Áustria	FPC	42	2001	Limpeza	60
MEXLUB	México	FPC	50	2015	pré aquecimento caldeira	55-80
Pachin Paints	Egito	FPC	38	2002	calor de processo	50
Penzkofer Autolackiererei	Alemanha	FPC	20	2013	secagem	N.I.
Ultramarine Pigments	Índia	PDR	570	2016	Secagem	200
Procter & Gamble	China	PTC	4600	2016	Geração de vapor	160

N.I.= Não
Informado

A.5 Setor Têxtil

Tabela A.5 - Indústrias do setor têxtil com SHIP. Adaptado de: [IEA, 2018]

Empresa	País	Tipo coletor	Área [m²]	Ano instalação	Uso energia solar	Temperatura [°C]
Jiangsu Printing and Dyeing	China	ETC	9000	2011	pré aquecimento caldeira	50
Ruyi Textile	China	ETC	9903	2015	tingimento	60
Acme McCrary	EUA	FPC	743	2012	secagem	N.I.
Allegro S.A.	Grécia	FPC	70	1993	lavagem	30-60
Daly Textile	China	FPC	13000	2007	tingimento	55
Guetermann Polygal	México	FPC	450	2001	pré aquecimento caldeira	50-90
Grammer Soalr Vietnam	Vietnã	FPC	480	2012	calor de processo	N.I.
Harlequin	Espanha	FPC	47	2002	pré aquecimento caldeira	N.I.

Empresa	País	Tipo coletor	Área [m²]	Ano instalação	Uso energia solar	Temperatura [°C]
Kastrinogiannis S.A.	Grécia	FPC	174	1993	tingimento	27-60
Sharman Shawls	India	FPC	360	2015	pré aquecimento caldeira	60-80
Tamil Nadu	India	LFR	1080	N.I.	calor de processo	100-135
Purple Creation	India	PDR	480	2013	calor de processo	150
Purple Creation	India	PDR	480	2012	calor de processo	150-160
Meiser Textil	Alemanha	PTC	100	N.I.	calor de processo	140
Siddhart Surgicals	india	PTC	263	2014	limpeza	110

N.I.= Não Informado