

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ENGENHARIA DE ENERGIA

IDENTIFICAÇÃO DE ETAPAS DE PROCESSOS DE PRODUÇÃO FAVORÁVEIS AO USO DE
SISTEMA SOLAR DE AQUECIMENTO DE ÁGUA

por

Jéssica Dall'Igna Bordignon

Monografia apresentada à Comissão de Graduação do Curso de Engenharia de Energia da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro de Energia.

Porto Alegre, dezembro de 2016



Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Engenharia de Energia

**IDENTIFICAÇÃO DE ETAPAS DE PROCESSOS DE PRODUÇÃO FAVORÁVEIS AO USO DE
SISTEMA SOLAR DE AQUECIMENTO DE ÁGUA**

por

Jéssica Dall'Igna Bordignon

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO DE ENERGIA
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Roberto Chouy Leborgne
Coordenador do Curso de Engenharia de Energia

Orientadora: Profa. Dra. Letícia Jenisch Rodrigues

Banca examinadora:

Prof. Dr. Arno Krenzinger DEMAT/UFRGS

Prof. Dr. Paulo Smith Schneider DEMEC/UFRGS

Profa. Dra. Letícia Jenisch Rodrigues DEMEC/UFRGS

Porto Alegre, 09 de dezembro de 2016.

DEDICATÓRIA

Aos meus pais Jayme Bordignon e Noeli Dall Igna Bordignon, que desde sempre me incentivaram a perseguir meus objetivos.

Ao meu irmão Jayme G. Bordignon, que sempre foi excelente ouvinte e companheiro em madrugadas de estudo.

Ao Cássio Boone, pelo carinho e apoio.

AGRADECIMENTOS

À professora orientadora Dra. Letícia Jenisch Rodrigues, pela atenção, comprometimento e incentivo com que sempre me atendeu e auxiliou ao longo de todo o semestre.

Ao professor Dr. Paulo Smith Schneider, pela grande contribuição e disponibilidade.

À Engenheira Nathalia Tupinamba Karmaluk, da Lojas Quero-Quero S/A, pela compreensão, quando foi necessário flexibilizar horários.

Aos meus colegas da Engenharia de Energia pelo companheirismo durante a graduação.

A todos os professores que fizeram parte da minha formação desde a infância até o ensino superior.

BORDIGNON, J.D. Identificação de etapas de processos de produção favoráveis ao uso de sistema solar de aquecimento de água. 2016. 21 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia de Energia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

RESUMO

O consumo energético industrial ocupa posição de destaque na matriz energética brasileira e este perfil é verificado também na matriz energética do Rio Grande do Sul, onde a indústria representa 21% do consumo estadual. Este estudo foi realizado a partir de pesquisa bibliográfica em artigos nacionais e internacionais para identificar setores industriais e processos de produção com potencial para utilização de sistema de aquecimento solar de água (SAS). A atividade industrial e a radiação solar no Rio Grande do Sul foram mapeadas, resultando em condições favoráveis a emprego de SAS no estado. Foi realizado um estudo de caso utilizando o software f-chart para simular a instalação de SAS e a fração solar obtida para quatro microcervejarias com faixas de consumo distintas e localizadas em Porto Alegre. Ao final, verificou-se a viabilidade econômica da aplicação em cada microcervejaria. A taxa de retorno apresentou resultados mais favoráveis para consumos superiores a 300 kg/dia.

PALAVRAS-CHAVE: Sistema de aquecimento solar de água, Setores Industriais, Processos de Produção, SAS industrial.

BORDIGNON, J.D. A review on solar water heating in the industries sectors and production processes. 2016. 21 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia de Energia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

ABSTRACT

The industrial sectors in Brazil requires large amounts of electrical and thermal energy and this behavior is the same for Rio Grande do Sul, approximately 21% of the state consumption. The present paper presents a bibliographic research on national and international articles to identify industrial sectors and production processes with potential for solar water heat applications. It's presented the industrial activity and solar radiation for the Rio Grande do Sul, concluding that there are favorable conditions to solar industrial water heating. F-Chart software was used to simulate the performance of the solar system in four breweries in Porto Alegre. Finally, the economic viability was calculated based on the annual energy gains and the system costs, depending on the collector area. The internal return rate showed better results for systems with consumption higher than 300 kg/day.

KEYWORDS: Solar water heating, Industry sectors, production processes, Solar industrial heating

Sumário

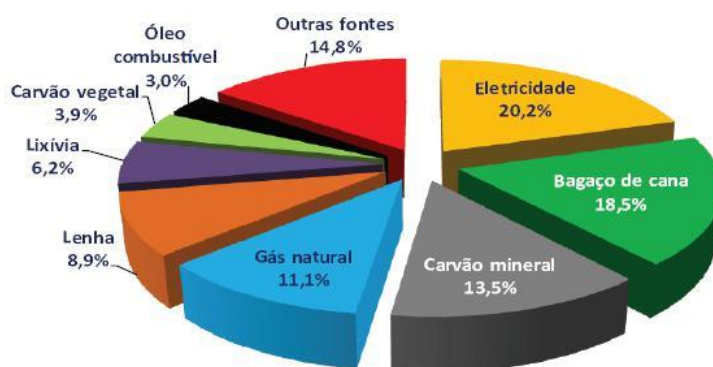
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivos.....	2
1.2 Metodologia	3
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	3
2.1. Sistema de aquecimento solar de água (SAS)	3
2.2. Coletores solares	3
2.3. Sistema auxiliar de aquecimento	4
3. SETORES INDUSTRIAIS E PROCESSOS FAVORÁVEIS AO USO DE SAS	4
4. INDÚSTRIAS E PROCESSOS NO RIO GRANDE DO SUL	8
5. INCIDÊNCIA SOLAR NO RIO GRANDE DO SUL.....	11
6. ESTUDO DE CASO	12
6.1. Produção de cerveja.....	12
6.2. Software f-Chart.....	14
6.3. Simulação	15
6.4. Modelagem econômica.....	16
7. CONCLUSÃO.....	18
7.1. Discussão.....	18
7.2. Trabalhos futuros	19

1. INTRODUÇÃO

A indústria é o segmento que mais consome energia no Brasil. Apesar de apresentar uma queda de 0,9% em relação ao ano anterior, o setor industrial representou em 2014, 32,9% do total de energia consumida no país. O consumo energético industrial está dividido principalmente nos segmentos de alimentos e bebidas (8,4%), ferro-gusa e aço (6,2%), papel e celulose (4,3%) e indústria química (2,5%).

A principal fonte energética da indústria, em nível nacional, é a eletricidade, que representa 20,2% do total consumido, seguida pelo bagaço de cana (18,5%) e carvão mineral (13,5%). A Figura 1 ilustra a participação das fontes energéticas na indústria, onde as fontes renováveis representam 54% do total consumido (BEN, 2015).

Figura 1 - Consumo de energia no setor industrial no Brasil.



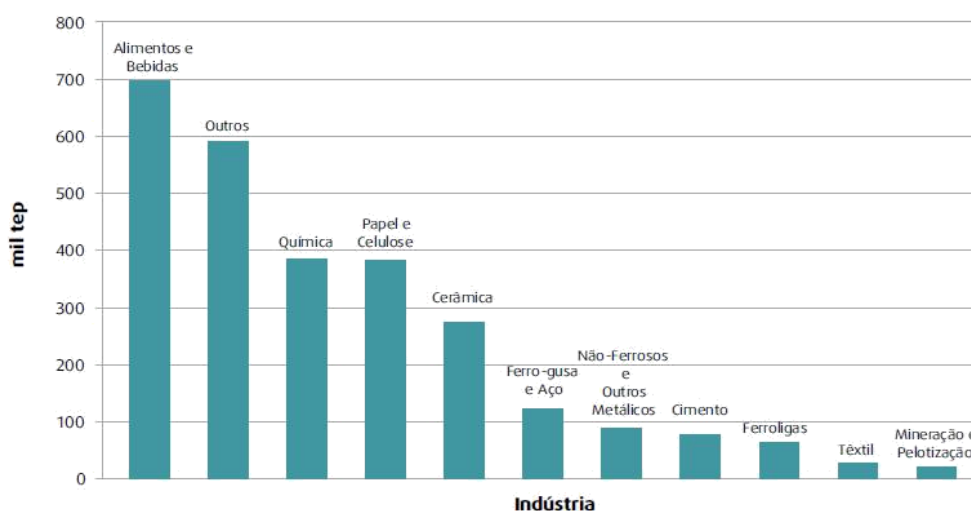
Fonte: BEN, 2015.

No Rio Grande do Sul o consumo energético industrial totalizou 21,44% em 2014, sendo que 29,9% deste consumo foi de eletricidade, seguido pelo carvão vapor (20,99%), lenha (12,20%) e gás natural (9,17%). A Figura 2 apresenta a participação dos segmentos industriais no consumo energético do estado, com destaque para a indústria de alimentos e bebidas, química, papel e celulose (CEEE, 2015).

O uso da energia solar para aquecimento de água está em expansão no mundo, em 2014 foram instalados 66,7 milhões de metros quadrados de coletores solares. Os maiores mercados são a China e a Europa, que juntos totalizaram 85,9% da capacidade instalada no ano. A principal aplicação mundial é o aquecimento doméstico (63%), seguido pelo uso comercial em hotéis e hospitais (28%), uso combinado para aquecimento de água e ambientes (2%) e apenas 1% é empregado para aquecimento industrial (IEA, 2015)

Segundo a European Solar Thermal Industry Federation (ESTIF), o emprego de energia solar térmica na indústria se destacou em 2014 nos segmentos de alimentos e bebidas com 30% da área instalada, mineração (28%) e têxtil (22%). Além disso, os coletores de placa plana representaram 65% do total instalado em indústrias, seguidos pelos coletores de tubo evacuado (21%) e concentradores parabólicos (7%) (ESTIF, 2015).

Figura 2 - Consumo energético industrial no Rio Grande do Sul, 2014



Fonte: Balanço Energético Estadual, RS - CEEE

Carreira, 2015, identificou através de revisão bibliográfica o estágio atual das aplicações de aquecimento solar de água para fins industriais no mundo. Foi realizada uma pesquisa de dados no mercado brasileiro e foram identificados os pontos favoráveis e desfavoráveis a utilização da energia solar térmica em indústrias. As aplicações mostraram-se viáveis, mas ficou evidenciada a carência de profissionais especializados na área.

Dantas e Costa, 2014 verificaram a viabilidade econômica da implementação de SAS em uma indústria de laticínios com consumo médio diário aproximado em 1000 kg de água e localizada no Rio de Janeiro. Os autores empregaram o método ϕ , f-chart modificado e o software TRNSYS na análise, concluindo que a melhor taxa de retorno, 22,7%, foi alcançada com 10m² de área coletora.

1.1 Objetivos

Este trabalho tem por objetivo geral identificar os setores industriais e as etapas de produção que sejam mais favoráveis ao emprego de SAS (sistema de aquecimento solar de água), relacionando-os com a atividade industrial no Rio Grande do Sul e a incidência solar anual no estado.

1.2 Metodologia

Através de revisão bibliográfica, pretende-se identificar possíveis processos nos quais o fluido de trabalho (água) possa passar por um pré-aquecimento utilizando um SAS. Ao final, realizar-se-á um estudo de caso, fazendo a avaliação econômica da inserção desse sistema em micro cervejarias localizadas na cidade de Porto Alegre utilizando o software f-chart.

O presente trabalho apresenta a seguinte estrutura:

- Fundamentação teórica;
- Identificação de setores e processos industriais favoráveis ao uso de SAS;
- Mapeamento da atividade industrial no Rio Grande do Sul;
- Caracterização da incidência solar no Rio Grande do Sul;
- Estudo de caso e viabilidade financeira em microcervejarias;

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Sistema de aquecimento solar de água (SAS)

Um sistema de aquecimento solar de água é composto principalmente por coletores solares, tubulações, reservatório térmico e sistema de aquecimento auxiliar. Os sistemas podem funcionar com circulação de água pela convecção natural (passivos) ou com auxílio de bomba (ativos). Os sistemas ativos possuem um controlador que verifica a temperatura na entrada e na saída do coletor, sendo que enquanto a temperatura do fluido que deixa o coletor for maior que a temperatura que entra no coletor a bomba continuará em funcionamento (Lourenço, 2000).

2.2. Coletores solares

Existem vários tipos de coletores disponíveis no mercado, sendo que dois grupos podem ser empregados em processos industriais, os coletores estacionários ou com um eixo de acompanhamento. Os coletores estacionários podem ser de placa plana, tubo evacuado ou coletor parabólico composto, já os coletores com um eixo de acompanhamento são de lente Fresnel, calha parabólica ou cilíndrica (Kalogirou, 2014). A Tabela 1 detalha a faixa de temperatura que caracteriza cada um dos coletores citados.

Os coletores mais difundidos na aplicação de SAS na indústria são os estacionários de placa plana ou tubo evacuado. O coletor de placa plana necessita pouca manutenção e pode ser aplicado a processos com demanda de água a temperatura moderada, menor que 100° C. Os principais componentes deste coletor são a cobertura transparente responsável pelo efeito estufa, redução das perdas por convecção e estanqueidade, a placa coletora responsável por absorver a radiação solar e transferir para o fluido, a tubulação por onde passa o fluido, o

isolamento térmico para evitar perdas de calor para o exterior e a carcaça para proteção e suporte.

Tabela 1 – Tipos de coletores

Tipo de coletor	Temperaturas (°C)
Coletor de placa plana	30 - 80
Coletor de tubo evacuado	50 – 200
Coletor parabólico composto	60 – 240
Coletor de lente Fresnel	60 - 250
Coletor de calha parabólica	60 – 300
Coletor de calha cilíndrica	60 - 300

Fonte: Adaptado de Kalogirou, 2003

Os coletores de tubo evacuado podem atingir temperaturas maiores, chegando a 200 °C. Estes coletores são compostos por 2 tubos de vidro concêntricos, isolados a vácuo, sendo que o fluido de trabalho passa pelo tubo interno. A radiação solar ao incidir sobre o tubo, aquece o fluido de trabalho, que sobe por diferença de densidade ao cabeçote, fazendo com que o fluido mais frio desça aos tubos (Rosa, 2012).

2.3. Sistema auxiliar de aquecimento

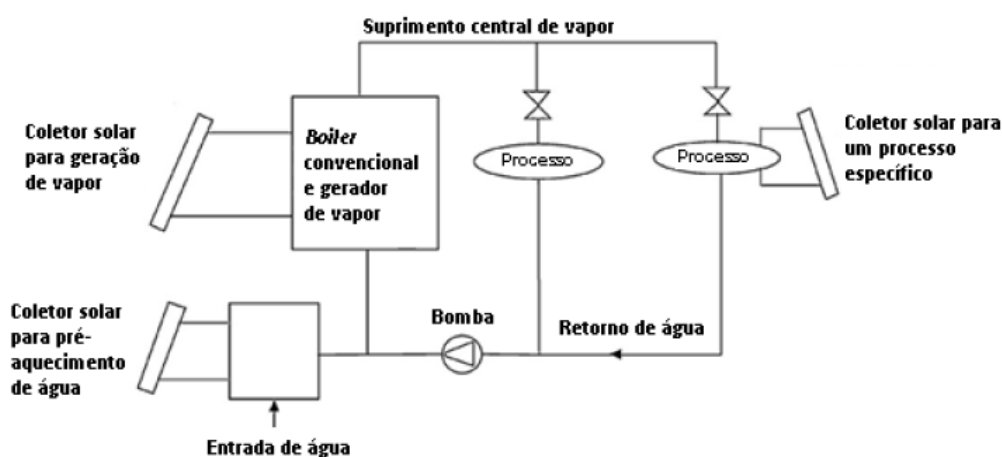
O sistema auxiliar de aquecimento está presente para garantir a segurança do sistema e complementar o aquecimento solar. A natureza da energia auxiliar utilizada geralmente provém da eletricidade, lenha ou gás. O modelo mais difundido de aquecimento auxiliar no Brasil é instalado diretamente no tanque de armazenamento, normalmente com utilização de resistência elétrica. Outro sistema possível é o aquecedor de passagem posicionado em série ou em paralelo com os coletores solares, comumente utilizando como combustível o gás. (Lourenço, 2012)

3. SETORES INDUSTRIAIS E PROCESSOS FAVORÁVEIS AO USO DE SAS

A energia solar térmica pode ser empregada na indústria como fonte de alimentação para sistemas de aquecimento ou diretamente em etapas do processo produtivo, representando uma redução no consumo de combustíveis fósseis e emissão de gases poluentes. O emprego de sistemas de aquecimento solar de água (SAS) é a aplicação mais comum e com melhor retorno econômico (Mekhilef et al. 2011).

O primeiro passo para a integração é identificar se a aplicação será realizada para o suprimento de energia ou diretamente no processo. Segundo a International Energy Agency Technology (IEA), a integração de SAS em termos de processo requer um detalhamento maior do ponto de integração e apresenta menos flexibilidade para adaptações futuras do que a integração em termos de suprimento. A Figura 3 ilustra algumas opções de integração do SAS em um processo industrial genérico.

Figura 3 - Integração de coletores solares em um processo industrial



Fonte: Adaptado de Mekhilef et al (2010)

A integração em nível de suprimento de energia, deve considerar o meio de transferência de calor existente, dividido em vapor ou meio líquido (água quente). Diferentes meios de transferência significam diferentes configurações de trocadores de calor. Se o meio utilizado for vapor, existem três possibilidades de aplicação: geração de vapor, aquecimento de água de alimentação de caldeira e aquecimento de água de compensação. Se o meio utilizado for líquido (água quente), pode-se integrar o SAS em paralelo ou em série com outro sistema de aquecimento ou integrar o SAS a tanques de armazenamento, sendo utilizado para pré-aquecer a água na entrada do tanque ou para manter a temperatura do tanque.

Em se tratando de processos, o SAS pode ser empregado para pré-aquecimento de corrente de fluido, aquecimento e manutenção de temperatura em banhos e tanques ou processos de separação por temperatura. O aquecimento pode ser realizado com trocadores de calor externos, internos ou com injeção de vapor.

O maior potencial de aplicação da energia solar térmica em processos industriais está em processos caracterizados por temperaturas entre 60° C e 240° C. Segundo estudos da IEA, a energia solar térmica é capaz de suprir de 3 a 4% do total de energia mundialmente consumida pelo setor industrial. As características térmicas do processo industrial e a área disponível para instalação influenciam na performance do sistema solar, deve-se considerar a energia solar

disponível localmente para identificar as aplicações mais favoráveis e realizar simulações de integração do sistema solar em bases anuais para contemplar as flutuações climáticas (Baniassadi et al. 2015).

Kalogirou, 2002, apresenta na Tabela 2 os processos com temperaturas compatíveis com a utilização de SAS. Destacam-se as indústrias química, alimentícia, de bebidas, papelera e têxtil que apresentam processos com temperaturas menores de 100 °C.

Tabela 2 - Processos industriais e faixas de temperaturas

Indústria	Processo	Temperatura (°C)
Laticínio	Pasteurização	60 - 80
	Esterilização	100 - 120
	Secagem	120 - 180
	Água alimentação de caldeiras	60 - 90
Alimentos em conserva	Esterilização	110 - 120
	Pasteurização	60 - 80
	Cozimento/Branqueamento	60 - 90
Têxtil	Branqueamento/Tingimento	60 - 90
	Secagem	100 - 130
Papel	Cozimento/Secagem	60 - 80
	Água alimentação de caldeiras	60 - 90
	Branqueamento	130 - 150
Química	Aquecimento de processos	120 - 180
	Pré-aquecimento de água	60 - 90
Carne	Lavagem	60 - 90
	Cozimento	90 - 100
Bebidas	Lavagem/Esterilização	60 - 80
	Pasteurização	60 - 70
Plásticos	Preparação	120 - 140
	Destilação	140 - 150
	Secagem	180-200

Fonte: Adaptado de Kalogirou, 2003

Na indústria alimentícia e de bebidas a maior parte do calor demandado (58%) apresenta temperatura menor que 100°C. Os subsetores de maior destaque contemplam a produção de leite, carne, frutas, vegetais, cerveja e malte. Dentre estes subsetores destacam-se os processos de pasteurização (65 – 100 °C), cozimento (100 °C), secagem no processamento de frutas e vegetais (40 – 130 °C) e lavagem de produtos e utensílios em todos os processos (60 – 90 °C) (Lauterbach *et al.*, 2012).

Mauthner *et al.* 2013, retratou a implementação de SAS diretamente nos processos de cervejarias e maltarias utilizando coletores de placa plana para obter temperaturas inferiores a 80 °C. O autor analisou a integração de SAS em três diferentes plantas, no processo de maceração (58 – 78 °C) na Cervejaria Goess na Áustria, no processo de pasteurização da cerveja (63 – 65 °C) na Cervejaria Valencia na Espanha e no processo de secagem do malte (35 – 55 °C) na Maltaria Vialonga em Portugal. A Tabela 3 apresenta os processos térmicos da indústria de malte e cerveja com as respectivas temperaturas características.

Tabela 3 – Processos e temperaturas em cervejarias e maltarias

Processos	Temperaturas [°C]
Remoção de água do malte verde – 1ª etapa	35 – 60
Remoção de água do malte verde – 2ª etapa	80 – 100
Higienização de garrafas e latas	30 – 80
Higienização de equipamentos	80 – 90
Pasteurização	60 – 80
Aquecimento do mosto	80 – 100
Fervura do mosto	100

Fonte – Adaptado de Mauthner *et al.*, 2013

No processo de maceração o SAS foi empregado para suprir 30% da energia térmica demandada, fornecendo água quente (80 °C), que posteriormente é enviada a um trocador de calor de placas, com aquecimento auxiliar de um aquecedor a biomassa, sendo 1500 m² de coletores de placa plana e um tanque de armazenamento de 200 m³. O processo de pasteurização foi integrado a 1620 m² de coletores de placa plana, com tanque de armazenamento de 350 m³, com objetivo de pré-aquecer a água de entrada do gerador de vapor (66 °C), através de um trocador de calor, representando 45% da energia térmica demandada pelo processo.

Anderson *et al.*, 2007, utilizou o método f-Chart para avaliar a integração de SAS em indústrias de laticínios localizadas na Nova Zelândia. A aplicação consistia em aquecer a água da temperatura inicial a 40 °C até 80 °C, empregando três diferentes valores de consumo diário

característicos de pequenas (10 m³), médias (25 m³) e grandes (100 m³) indústrias de laticínios e comparando o desempenho de coletores de placa plana e tubo evacuado com e sem cobertura preta. Os melhores valores de fração solar foram obtidos com a utilização de tanques de armazenamento que respeitavam a relação de 50 litros por m² de área coletora. A análise concluiu que coletores de tubo evacuado sem cobertura refletora apresentaram desempenho 25% inferior aos coletores de placa plana para todos os casos. O desempenho dos coletores de tubo evacuado com cobertura refletora foi superior aos coletores de placa plana nos meses com menor radiação.

A indústria do papel utiliza 75% da sua demanda total de energia primária para processos de aquecimento a baixas ou médias temperaturas (50 – 250 °C). Coletores de placa plana e tubo evacuado podem ser empregados no processo de cozimento que requer água tratada com temperatura entre 60 °C e 80 °C e coletores concentradores podem ser empregados na alimentação de caldeiras para geração de vapor (Sharma *et al.*, 2015). O consumo de energia representa de 11 a 25% do custo total na produção do papel (Lauterbach *et al.*, 2012).

Outro setor industrial com potencial é a indústria têxtil, estima-se que de 25 a 50% do calor demandado pode ser fornecido por SAS. Processos com maior potencial de aplicação englobam lavagem (40 - 90°C), secagem, branqueamento (70 - 100°C) e tintura (40 – 120 °C) (Lauterbach *et al.*, 2012).

Baniassadi *et al.*, 2015 realizou um estudo de caso para implementação de SAS em uma planta de destilação responsável por separar o petróleo em três subprodutos. A instalação não conta com reservatório térmico e foi analisado o emprego de coletores de tubo evacuado para suprir uma parte da demanda total de 4000 kW em um processo de aquecimento de 20°C a 180 °C. O software utilizado foi o EnergyPlus, que conta com arquivos climáticos, resultando em 3 cenários que consideravam a utilização de 500, 750 e 1000 coletores. O payback final da instalação ficou entre 7 e 10 anos e a participação do sistema solar na demanda total de energia variou entre 3 e 6%.

4. INDÚSTRIAS E PROCESSOS NO RIO GRANDE DO SUL

A indústria representou 24,3% do PIB do Rio Grande do Sul em 2013 e alcançou 6,1% no total de participação na indústria nacional, empregando 825 mil trabalhadores em todo o estado. A Tabela 3 apresenta a participação de cada setor no PIB industrial do estado em 2013. As atividades industriais identificadas anteriormente com potencial para emprego de SAS (alimentos, químicos, celulose e papel, bebidas e têxtil) totalizaram 20,9% do PIB industrial do RS.

Tabela 4 – Participação dos setores no PIB industrial do RS

Setor industrial	Participação (%)
Construção	21,7
Alimentos	11,5
Veículos automotores	9,5
Máquinas/Equipamentos	8,2
Químicos	5,8
Utilidade pública	5,4
Couros e calçados	4,9
Produtos de metal	4,9
Fumo	3,4
Borracha e material plástico	3,2
Móveis	3,0
Minerais não metálicos	2,0
Metalurgia	1,8
Bebidas	1,8
Derivados de petróleo	1,8
Equipamentos de transporte	1,5
Máquinas e materiais elétricos	1,5
Celulose e papel	1,2
Manutenção	1,1
Madeira	0,9
Informática/Eletrônicos	0,9
Vestuário	0,9
Têxteis	0,6
Outros	2,5

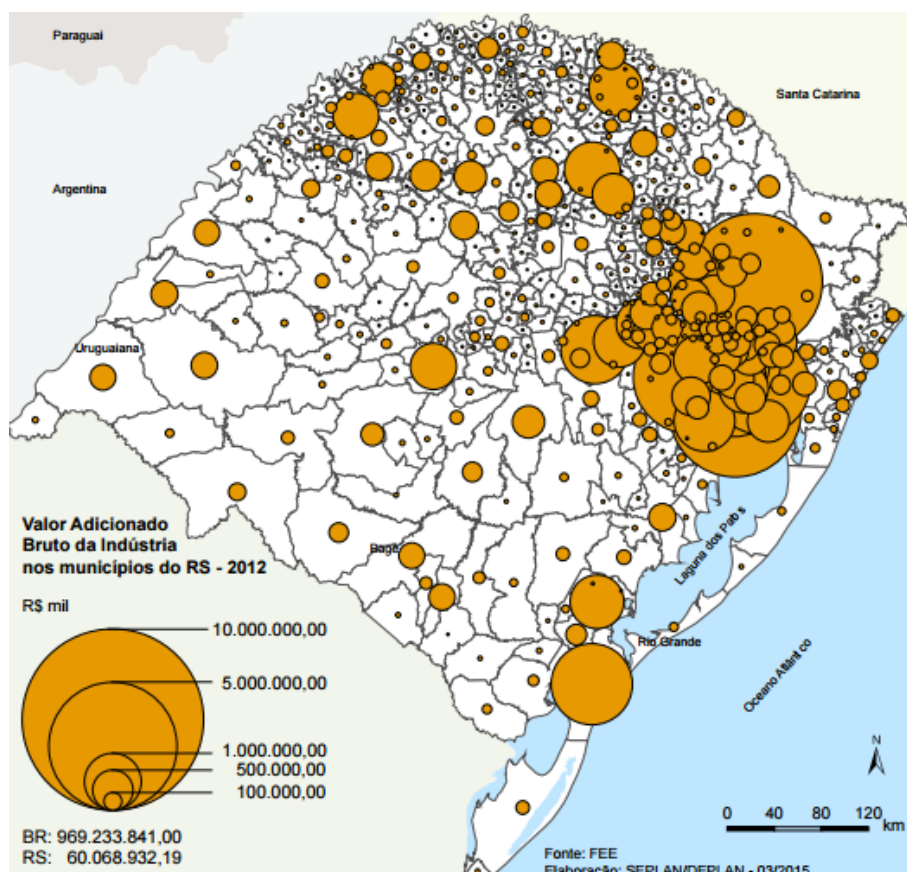
Fonte: Adaptado de CNI, 2013

De acordo com o Atlas Socioeconômico Regional de 2013, publicado pela Secretaria do Planejamento, Mobilidade e Desenvolvimento Regional (SEPLAN), o Valor Adicionado Bruto (VAB) da indústria do Rio Grande do Sul foi de 60 bilhões de reais em 2012, representando 6,2% do valor total do Brasil. Na matriz do VAB, o setor industrial representa 25,2% do total, sendo que mais da metade deste percentual é da indústria de transformação, que ocupa nacionalmente a terceira posição, com uma participação de 8,6%.

Os principais segmentos da indústria de transformação são os produtos alimentícios, derivados de petróleo, fabricação de veículos e produtos químicos. Em 2012, 15 municípios

representaram mais de 50% do VAB industrial do estado, com destaque para as cidades de Candiota e Pinhal da Serra na produção e distribuição de eletricidade e Triunfo na fabricação de produtos derivados do petróleo. A Figura 4 representa a distribuição estadual do VAB da indústria em 2012, ilustrando a concentração do VAB nos municípios da região metropolitana de Porto Alegre.

Figura 4 - Distribuição estadual do VAB da indústria em 2012



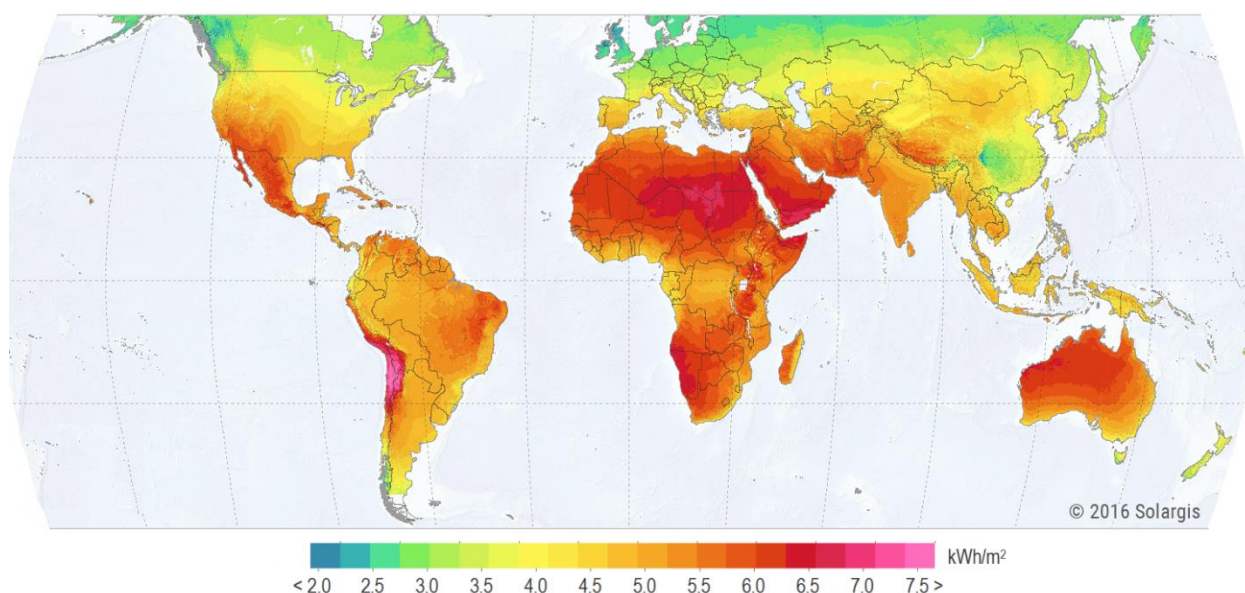
Fonte: SEPLAN, 2013

A indústria de alimentos apresenta grande dispersão territorial no estado, com presença em mais de 80% dos municípios, com destaque para Porto Alegre, Erechim, Pelotas e Lajeado que somam 29% do total de empregados. Ao contrário, a indústria de bebidas está concentrada em poucas cidades, Porto Alegre, Bento Gonçalves, Sapucaia do Sul, Viamão, Santa Maria e Flores da Cunha concentram 55% dos postos de trabalho.

A produção de celulose e papel está concentrada na região metropolitana de Porto Alegre e na serra gaúcha, sendo que Caxias do Sul, Guaíba, Campo Bom, Farroupilha, Canoas, Novo Hamburgo e Eldorado do Sul concentram 52% dos empregos. A indústria têxtil está presente em 142 municípios gaúchos, com 41% dos postos de trabalho concentrados em Caxias do Sul, Sapucaia do Sul e Novo Hamburgo.

A Figura 6 apresenta um panorama mundial da radiação solar. Em comparação com o continente europeu, todo território brasileiro ocupa posição privilegiada com radiação média diária superior ou igual a países com destaque em aplicações de SAS como Alemanha, Itália e Espanha.

Figura 6 – Radiação média diária global horizontal



Fonte – Solargis, 2015

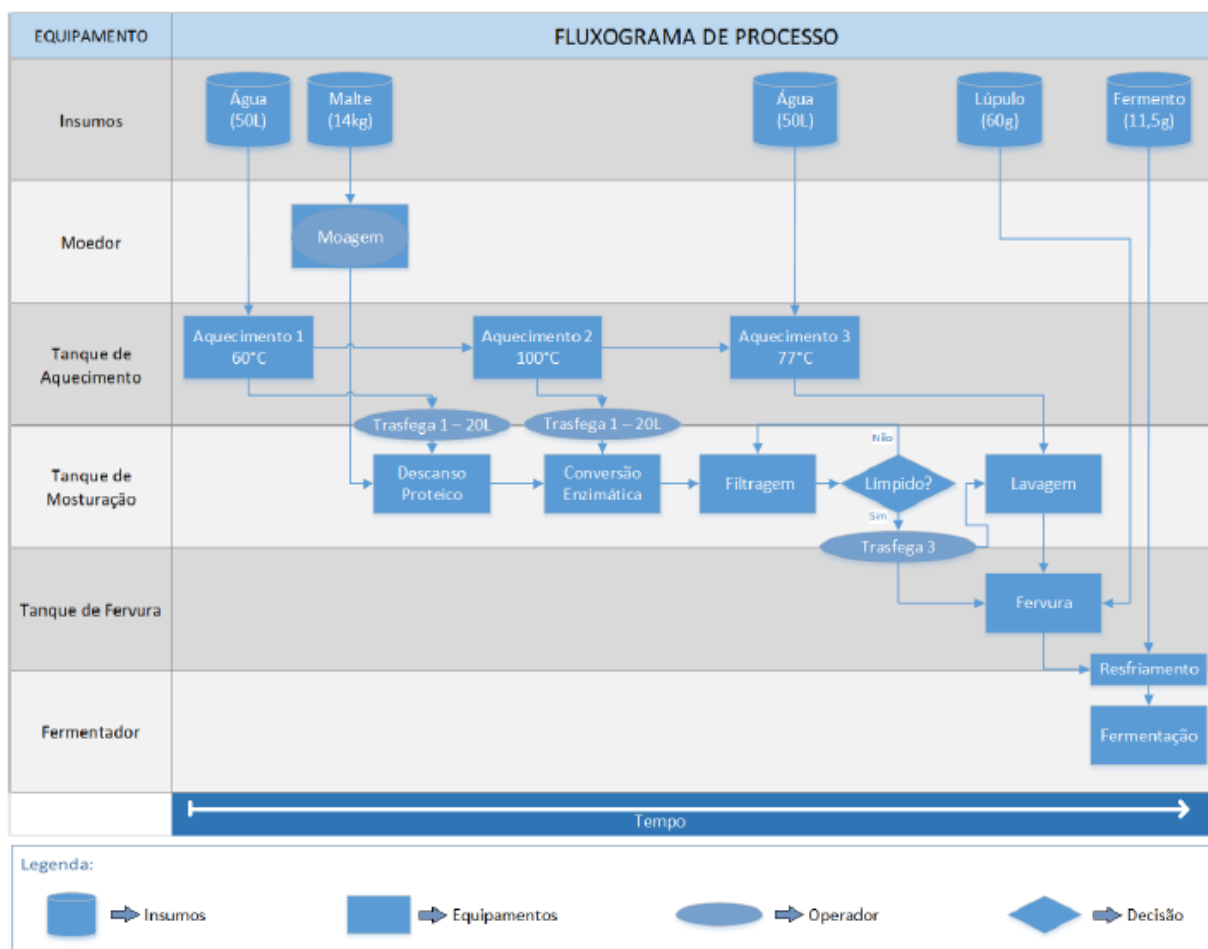
6. ESTUDO DE CASO

Neste estudo de caso, foi abordado a viabilidade econômica do uso de SAS em 4 microcervejarias localizadas em Porto Alegre. O sistema de aquecimento solar de água seria responsável pelo suprimento da primeira demanda de água quente (60°C) do processo de produção de cerveja por infusão.

6.1. Produção de cerveja

Ortiz, 2014 representou na Figura 7 em ordem cronológica da esquerda para a direita e de cima para baixo, o processo de produção de 50 litros de cerveja por infusão. Este processo inicia-se com o enchimento do tanque de aquecimento com 50 litros de água da rede, aquecendo-se até 60°C . Neste primeiro processo de aquecimento, foram necessários 25 minutos para aquecer a água da rede com temperatura inicial de 17°C , empregando uma resistência elétrica de potência 5359 W, consumindo 8 MJ no aquecimento.

Figura 7 – Fluxograma do processo de produção de cerveja



Fonte: Ortiz, 2014

Este consumo de água e energia para o primeiro aquecimento foram extrapolados para outras microcervejarias na região de Porto Alegre listadas na Tabela 5. A temperatura de fornecimento da água foi fixada em 20 °C e a energia consumida para aquecimento na primeira etapa foi calculada considerando o calor específico da água igual a 4,19 kJ/kg.K.

Tabela 5 – Dados de consumo para 4 microcervejarias

Microcervejaria	Consumo mensal [litros]	Energia mensal [GJ]
Cervejaria A	2000	0,34
Cervejaria B	8000	1,34
Cervejaria C	15000	2,51
Cervejaria D	60000	10,06

Fonte – Elaborado pelo autor

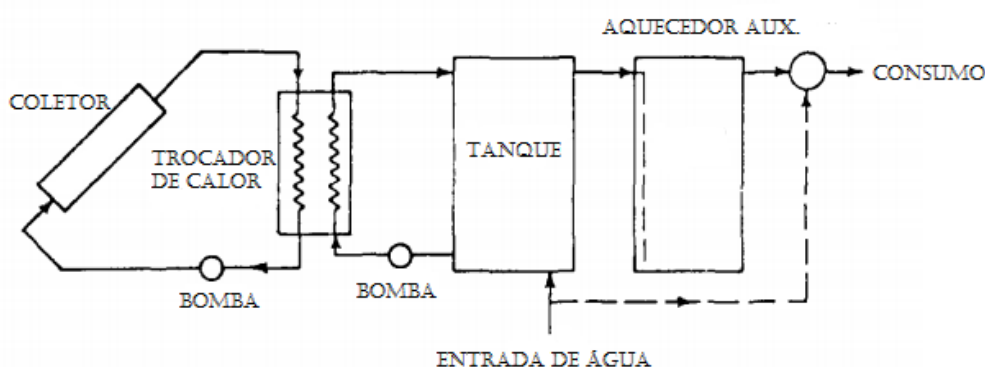
6.2. Software f-Chart

Santos, 2013 explica que o software comercial f-Chart aplica modelagem paramétrica, ou seja, emprega resultados experimentais e/ou simulações com modelagem física transiente para obter relações entre os parâmetros de entrada e os de saída, criando séries de curvas e equações que possam, estatisticamente, descrever essas relações e permitir a obtenção de informações úteis. Este método trabalha com a entrada de valores diário-médio-mensal, fornecendo a fração solar para cada mês independente do resultado obtido no mês anterior (modelo estático).

Haberl, 2004 realizou uma revisão bibliográfica para determinar as incertezas associadas com a utilização do software f-Chart para simulação de sistemas solares de aquecimento de água e ar. Diversos estudos mostraram que os resultados obtidos pelo f-Chart estão de 2 a 15% distantes de resultados medidos experimentalmente e de 1,1 a 4,7% distantes dos resultados obtidos em simulações realizadas no software TRNSYS. O método f-chart apresenta melhor desempenho quando empregado em análises de longo prazo.

A aplicação proposta neste estudo de caso foi simulada com o modelo ϕ , f-chart modificado por Braun e Klein (1983), pré-equacionado no software f-chart para sistemas genéricos de aquecimento solar, ilustrado na Figura 8 e composto principalmente por coletores solares, tanque de armazenamento, válvula de alívio de pressão, bomba e aquecedor auxiliar. Este modelo foi parametrizado para utilizar coletores de placa plana empregando água como fluido de trabalho, aquecimento auxiliar externo e descartar o uso de trocador de calor entre o coletor solar e o tanque de armazenamento. Na operação em loop aberto toda a água retirada do reservatório é substituída por água da rede de abastecimento.

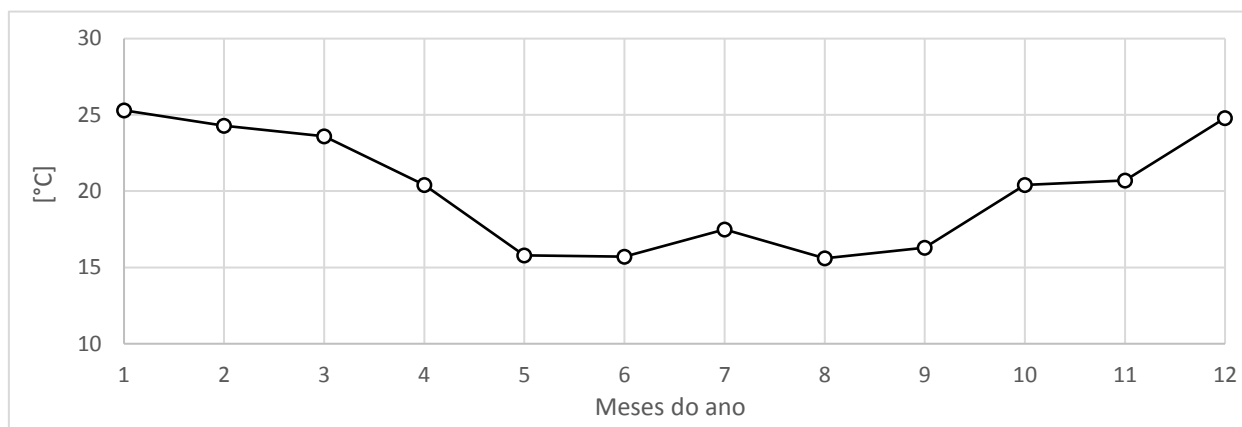
Figura 8 – Sistema genérico de aquecimento solar



Fonte: Adaptado de Braun e Klein (1983)

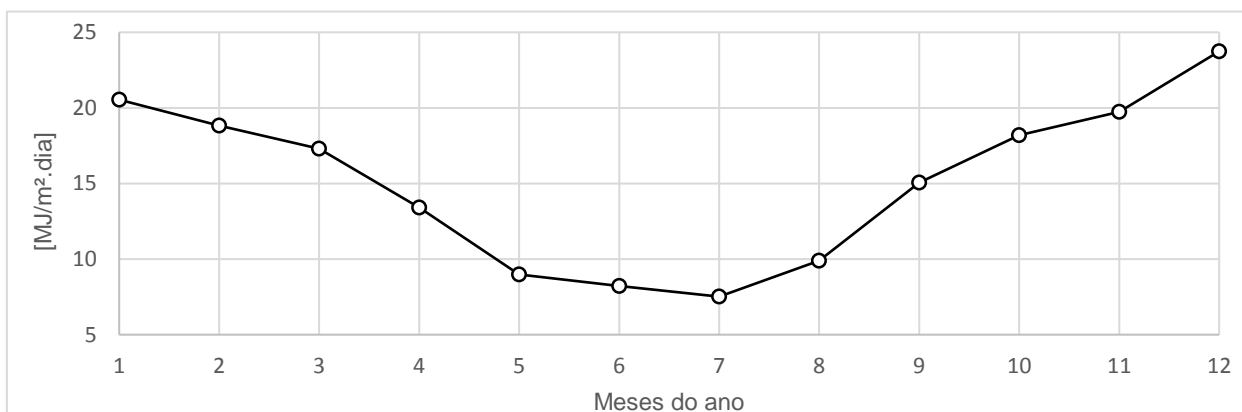
Os dados climáticos para Porto Alegre (radiação solar, temperatura ambiente e umidade do ar) foram obtidos nos arquivos climáticos disponibilizados pelo software Energy Plus que usa como fonte estações meteorológicas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). A Figura 9 apresenta a temperatura média para cada mês do ano representativo e a Figura 10 apresenta a radiação solar diária média.

Figura 9 – Temperatura média para Porto Alegre



Fonte: Energy Plus, 2015

Figura 10 - Radiação solar diária média mensal para Porto Alegre



Fonte: Energy Plus, 2015

6.3. Simulação

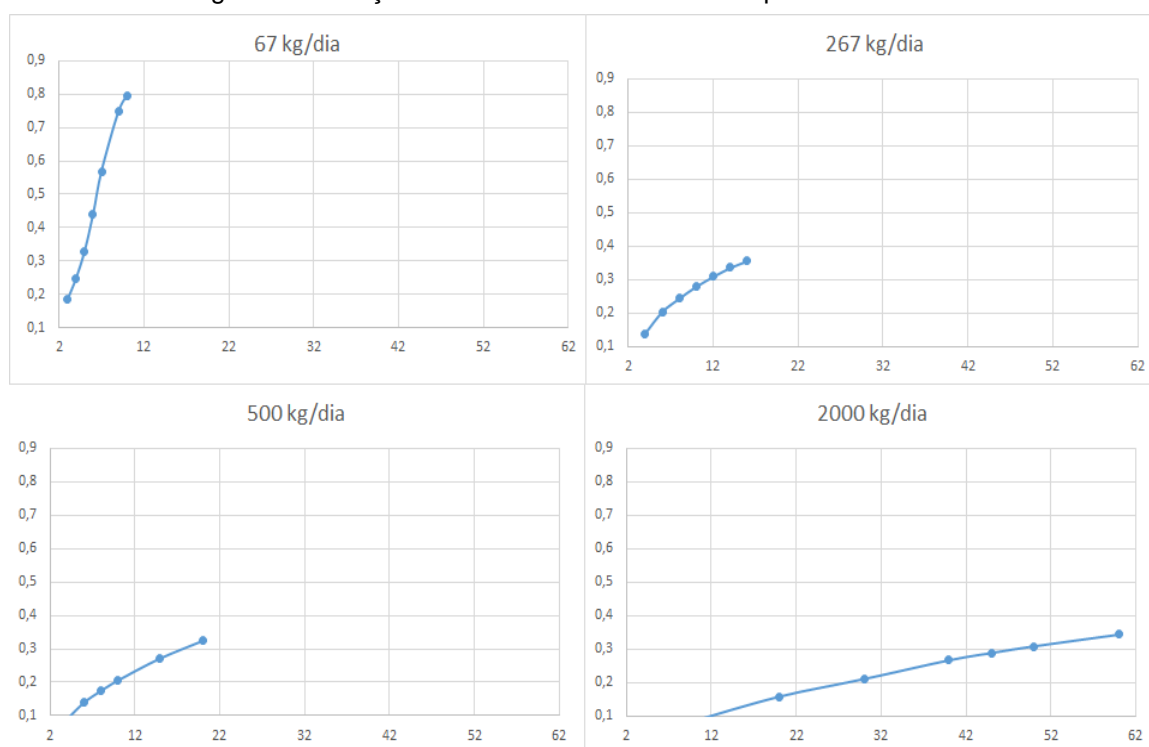
O sistema foi simulado em loop aberto, sem trocador de calor entre o coletor e o tanque de armazenamento, operando com vazão de $0,015 \text{ kg/s.m}^2$. O coletor solar de placa plana é o modelo MC 10 Evolution Pro fabricado pela Heliotek e classificado com etiqueta A no programa de etiquetagem do INMETRO. Este modelo apresenta uma camada de cobertura, eficiência energética média de 60,8%, 1m^2 de área coletora, 0,76 de eficiência óptica, $5,97 \text{ W/m}^2\text{K}$ de coeficiente global de perdas e coeficiente do modificador do ângulo de incidência constante e

igual a 0,1. A inclinação horizontal dos coletores foi fixada em 40° e a instalação foi direcionada para o norte conforme indicação da NBR 13369.

O fluido de trabalho para todo o sistema é a água, com calor específico de 4,19 KJ/kg.K e massa específica igual a 1000 kg/m³, com temperatura de consumo fixada em 60 °C. O aquecimento auxiliar será realizado por um aquecedor externo ao tanque de armazenamento com eficiência de 95%. O tanque de armazenamento apresenta coeficiente de transferência de calor igual a 2,7 W/m²K e isolamento em poliuretano, corpo interno em aço-inox e corpo externo em alumínio.

Além dos parâmetros que foram fixados para todas as simulações, existem os parâmetros modificados de uma microcervejaria para outra como a energia consumida diariamente em GJ e a carga diária em kg calculada para cada cervejaria. Após a implementação dos parâmetros, a operação de cada sistema foi simulada variando a área coletora para encontrar a fração solar anual, fixando o volume do reservatório em 50 litros para cada m² de área coletora. A Figura 11 apresenta a fração solar anual resultante em cada simulação.

Figura 11 – Fração solar média anual resultante para cada sistema



Fonte – Elaborado pelo autor

6.4. Modelagem econômica

O custo do coletor solar de placa plana (C_c) foi modelado a partir da Equação 1 proposta por Dantas e Costa, 2013 que considera um desconto na aquisição de grandes áreas de coletores

(A_c) a partir do custo unitário fixado em R\$450,00. O custo do reservatório (C_V) foi estimado a partir da Equação 2 proposta por Dantas, 2013 que foi construída a partir de valores de mercado para o ano de 2013 e o custo da bomba foi calculado a partir da Equação 3 que depende da vazão mássica (m) entre o reservatório e o conjunto de coletores.

$$C_c = 450 A_c (0,65 + 0,35 \times 2^{\frac{-A_c-1}{104}}) \quad (1)$$

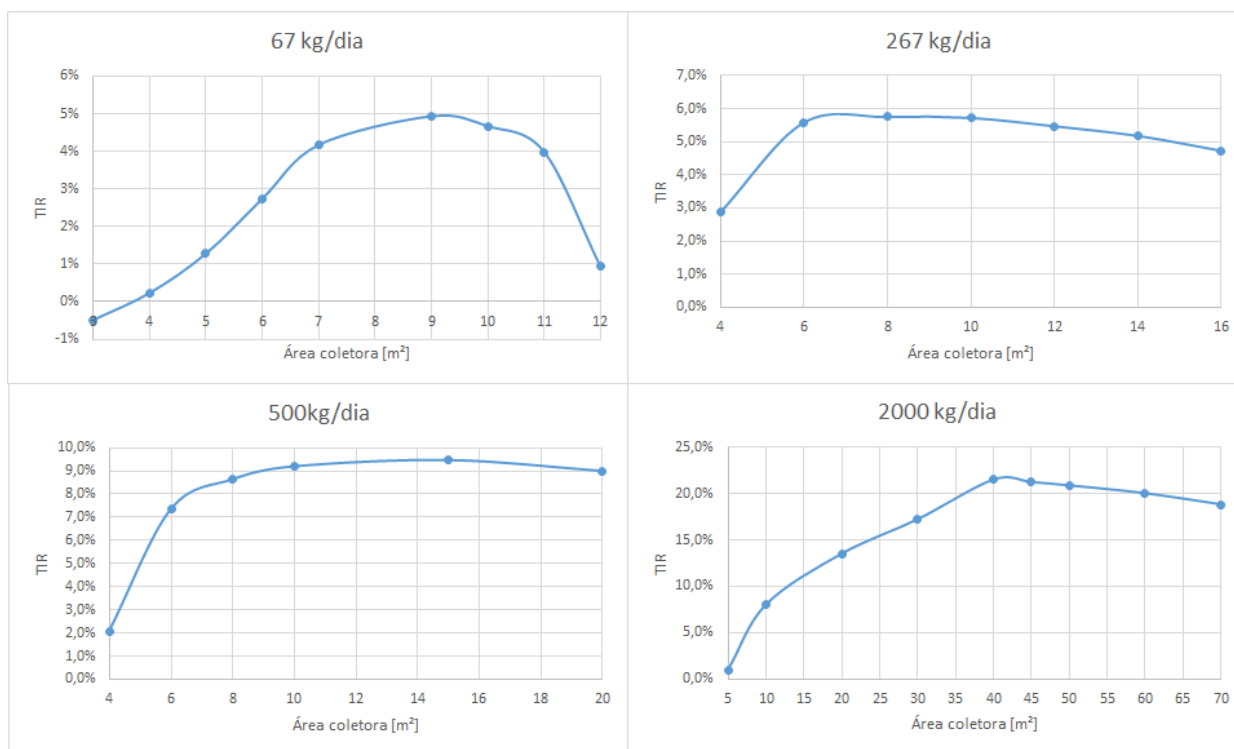
$$C_V = 5814 \times V^{0.76} \quad (2)$$

$$C_b = 407 + 719 \times m \quad (3)$$

O investimento em sistemas de controle, conexões, instalação e projeto foram considerados independentes da área coletora e fixados para cada cervejaria. A manutenção anual foi desconsiderada para a cervejaria A e fixada em 100, 200 e 300 reais para as cervejarias B, C e D, com reajuste anual fixado em 4%.

A modelagem econômica do sistema foi realizada considerando o custo para projeto, aquisição e instalação do SAS e a economia de energia elétrica. O aquecimento auxiliar elétrico foi fixado para os 4 casos e para simplificação dos cálculos a tarifa de energia elétrica foi fixada em R\$0,49 por kWh consumido com 30% de ICMS, valor condizente com a bandeira amarela para consumidor industrial do grupo B da Companhia Estadual de Energia Elétrica (CEEE) vigente a partir de 25/10/2016. O reajuste anual para a tarifa elétrica foi fixado em 4% ao ano.

Figura 12 – Taxa interna de retorno para cada consumo



Fonte – Elaborado pelo autor

Para cada perfil de consumo foi calculada a taxa interna de retorno (TIR) para o investimento no SAS considerando variações na área coletora. A Figura 12 apresenta os resultados obtidos para cada sistema, sendo que a configuração que apresentou a maior TIR está detalhada na Tabela 6.

Tabela 6 – Configuração ótima para cada cervejaria

Cervejaria	Área coletora [m ²]	Reservatório [m ³]	Fração solar	TIR
A	9	0,45	0,747	4,9%
B	8	0,4	0,243	5,8%
C	15	0,75	0,272	9,5%
D	40	2	0,266	21,5%

Fonte – Elaborado pelo autor.

7. CONCLUSÃO

7.1. Discussão

Este trabalho tinha por objetivo principal identificar setores industriais e processos de produção favoráveis ao uso de SAS, localizando estes processos no Rio Grande do Sul. A partir da literatura foram identificados os setores e processos favoráveis ao emprego de SAS. Destacam-se os setores de alimentos, bebidas, papelero e têxtil, com maior potencial para os processos que empregam água a temperaturas menores que 100 °C. Grande parte da literatura aborda o emprego de SAS na Europa, com destaque para aplicações em indústrias de laticínios e processos de produção de malte e cerveja.

Os setores industriais com maior potencial foram mapeados no Rio Grande do Sul a partir de dados disponibilizados no Atlas Socioeconômico Regional. Porto Alegre, região metropolitana e a serra gaúcha foram as localidades com maior presença de indústrias com potencial para uso de SAS. Outro ponto importante é a disponibilidade de recurso solar do estado, com valores até 2 kWh/m² superiores quando comparados com localidades do continente Europeu, como Alemanha e Itália, líderes em pesquisa na aplicação industrial de SAS.

O estudo de caso conduzido a partir do consumo estimado para 4 microcervejarias de Porto Alegre abordou a viabilidade econômica da instalação de SAS no suprimento da primeira demanda de energia térmica do processo de produção de cerveja. A simulação no software F-chart resultou na fração solar fornecida para cada sistema ao variar a área coletora da instalação, em concordância com a literatura, quanto maior a área coletora, maior a fração solar obtida.

A viabilidade do sistema foi calculada estimando custos e receitas ao longo dos 20 anos de vida útil do sistema com o objetivo de analisar a TIR para cada caso. A Cervejaria A e B, que consumem 67 kg/dia e 267 kg/dia, apresentaram o pior resultado. A taxa de retorno destas instalações foi inferior a 6% ao ano que é o rendimento da aplicação em poupança. A Cervejaria

C apresentou taxa ótima de retorno igual a 9,5% ao ano, resultado favorável quando comparado a aplicação em poupança, mas ainda desfavorável quando comparada a taxa SELIC de 14,15% ao ano. O melhor retorno econômico foi obtido na cervejaria C, com taxas superiores a 20% e valor ótimo igual a 21,5% ao ano para uma fração solar de 0,27.

7.2. Trabalhos futuros

Este estudo de caso abordou somente a primeira demanda de aquecimento do processo de produção de cerveja, a integração em outras etapas do processo pode rentabilizar melhor o investimento. A partir dos resultados obtidos pode-se considerar variações no tamanho do reservatório e no combustível utilizado no aquecimento auxiliar para uma mesma área coletora.

As configurações ótimas encontradas para cada microcervejaria podem ser simuladas em base horária no software TRNSYS para verificar o comportamento da temperatura no reservatório detalhando o perfil de consumo que não é constante ao longo do dia e da semana.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Anderson, T. N.; Duke, M. **Solar Energy Use for Energy Savings in Dairy Processing Plants**. IPENZ Engineering TreNz, 2008.

Baniassadi, A.; Momen, M.; Amidpour, M. **A New Method for Optimazation of Solar Heat Integration and Solar Fraction in Low Temperature Process Industries**. Energy, v. 90, p. 1674-1681, 2015.

BEN, 2015. **Balanco Energético Nacional 2015: Ano base 2014**. Empresa de Pesquisa Energética. Disponível em: https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2015.pdf. Acesso em: 20/09/2016.

Braun, J.E.; Klein, S.A.; Pearson, K.A. **An Improved Design Method for Solar Water Heating Systems**. Solar Energy, v. 31, p. 597-604, 1983.

Carreira, E.F. **Utilização de sistemas de aquecimento solar de água em processos industriais**. São Paulo, 2015.

CEEEa, 2015. **Balanco Energético do Rio Grande do Sul 2015: Ano base 2014**. Companhia Estadual de Energia Elétrica. Disponível em: http://www.ceee.com.br/pportal/ceee/Archives/Upload/Balanco_Energetico_RS_2015_base_2014_61962.pdf. Acesso em: 02/10/2016.

CEEEb, 2016. **Tarifas e Custos dos Serviços, consumidor em baixa tensão**. Companhia Estadual de Energia Elétrica. Disponível em: http://www.ceee.com.br/pportal/ceee/archives/Tarifas/Tarifas_Grupo_B_2016.pdf. Acesso em: 15/11/2016.

CEMETRS, 2015. **Atlas Climático do Rio Grande do Sul**. Centro Estadual de Meteorologia do Rio Grande do Sul. Disponível em: <http://www.r3pb.com.br/AtlasCemetRS/#/2/zoomed>. Acesso em: 10/10/2016.

CNI, 2013. **Portal da Indústria no Rio Grande do Sul**. Confederação Nacional da Indústria. Disponível em: <http://perfilestados.portaldaindustria.com.br/estado/rs>. Acesso em: 10/10/2016.

Dantas, F. e Costa, M.A. **Thermal and Economical Analysis of the Solar Preheating of Steam Boiler Feed Water**. Journal of Energy and Power Engineering, v. 8, p. 775-784, maio 2014.

Duffie, J. A. e Beckman, W.A. **Solar Engineering os Thermal Processes**. Wiley, New York, 4rd edition, 2013.

ESTIF, 2015. **Solar Thermal Markets in Europe: Trends ans Market Estatistics 2014**. European Solar Thermal Industry Federation. Disponível em: http://www.estif.org/fileadmin/estif/content/market_data/downloads/2014_solar_thermal_market_s_LR.pdf. Acesso em: 05/10/2016.

IEA, 2015. **Solar Heat Worldwide: Markets and Contribution to the Energy Supply 2013**. International Energy Agency. Disponível em: <https://www.iea-shc.org/data/sites/1/publications/Solar-Heat-Worldwide-2015.pdf>. Acesso em: 20/09/2016.

INMETRO, 2016a. **Sistemas e Equipamentos para Aquecimento Solar de Água – Reservatórios Térmicos de Baixa Pressão (AP)**. Programa Brasileiro de Etiquetagem. Rio de Janeiro, 2011. Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/consumidor/pbe/reservatorios-tecnicos-baixa-pressao.pdf>. Acesso em: 15/10/2016.

INMETRO, 2011b. **Sistemas e Equipamentos para Aquecimento Solar de Água – Reservatórios Térmicos Sem Apoio Elétrico**. Programa Brasileiro de Etiquetagem. Rio de Janeiro, 2011. Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/consumidor/pbe/reservatorio-solar-sae.pdf>. Acesso em: 15/10/2016.

INMETRO, 2011c. **Sistemas e Equipamentos para Aquecimento Solar de Água – Coletores Solares: aplicação banho e piscina**. Programa Brasileiro de Etiquetagem. Rio de Janeiro, 2011. Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/consumidor/pbe/coletores-solares-banho-e-piscina.pdf>. Acesso em: 15/10/2016.

Haberl, J. S. **Literature Review of Uncertainty of Analysis Methods (f-chart program)**. Texas Commission on Environmental Quality. Texas, agosto de 2014.

Kalogirou, S.A. **The potential of Solar Industrial Process Heat Applications**. Applied Energy, v. 76, p. 337-361, 2002.

Kalogirou, S. A. **Solar Thermal Collectors and Applications**. Progress in Energy and Combustion Science, v.30, p.231-295, 2014.

Lauterbach, C.; Schmitt, B.; Jordan, U.; Vajen, K. **The potential of Solar Heat for Industrial Processes in Germany**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 16, p. 5121-5130, 2012.

Lourenço, I. **Estudo de um Sistema de Aquecimento de Água Híbrido Gás-Solar**. Porto Alegre, 2000.

Mauthner, F.; Hubmann, M.; Brunner, C.; Fink, C. **Manufacture of Malt and Beer with Low Temperature Solar Process Heat**. Energy Procedia, v. 48, p. 1188-1193, 2014.

Mekhilef, S.; Saidur, R.; Safari, A. **A Review on Solar Use in Industries**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 15, p. 1777-1790, 2011.

Ortiz, P. B. **Análise do Consumo Energético do Processo de Produção de Cerveja Artesanal por Bateladas**. Porto Alegre, 2014.

Rosa, F. N. **Aplicabilidades de Coletores com Tubo Evacuado no Brasil**. Porto Alegre, 2012.

SEPLAN, 2013. **Atlas Socioeconomico do Rio Grande do Sul**. Secretaria do Planejamento, Mobilidade e Desenvolvimento Regional. Disponível em: <http://www.atlassocioeconomico.rs.gov.br/>. Acesso em: 23/10/2016.

Sharma, A.K. et al. **Potential of Solar Energy Utilization for Process Heating in Paper Industry in India: A Preliminary Assessment**. Energy Procedia, v. 79, p. 284-289, 2015.

Solargis. 2015. **Maps an gis data**. Solargis. Disponível em: <http://solargis.com/products/maps-and-gis-data/free/overview/>. Acesso em: 20/10/2016.