

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA

ALLAN PEDRO MOREIRA POVA

AVALIAÇÃO DO USO DE COLETORES SOLARES
PARA MELHORIA DE UM SISTEMA DE
AQUECIMENTO DE ÁGUA EM UMA INDÚSTRIA DE
SILICONES DE PERFORMANCE.

SÃO CARLOS -SP
2021

ALLAN PEDRO MOREIRA POVA

AVALIAÇÃO DO USO DE COLETORES SOLARES PARA MELHORIA DE UM SISTEMA DE AQUECIMENTO DE ÁGUA EM UMA INDÚSTRIA DE SILICONES DE PERFORMANCE.

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal de São Carlos, para obtenção do título de bacharel em Engenharia Química.

Orientador: João Paulo Silva Queiroz

São Carlos-SP
2021

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia
Departamento de Engenharia Química

Folha de aprovação

Assinatura dos membros da comissão examinadora que avaliou e aprovou a Defesa do Trabalho de conclusão de curso do aluno Allan Pedro Moreira Pova, realizada em 28/06/2021:

Prof. Dr. João Paulo Silva Queiroz
Universidade Federal de São Carlos

Profa. Dra. Alice Medeiros de Lima
Universidade Federal de São Carlos

Prof. Dr. Edson Luiz Silva
Universidade Federal de São Carlos

AGRADECIMENTO

Aos meus pais, Aparecida e Antonio, e aos meus irmãos, Anderson, Aline e Alex, por me ensinarem que família, amor e integridade são sinônimos. Na minha vida nunca terá sequer um momento onde não serei grato por vocês;

À Marina, por ser paz, incentivo, amparo, aconchego e companheirismo;

À República Dauhma, por ser família fora de casa, equilíbrio e representação de irmandade. Levarei para sempre comigo;

Aos meus amigos, especialmente os “Pacequers”, pelo apoio durante essa jornada;

Ao professor e orientador João Paulo Silva Queiroz pelo suporte durante o desenvolvimento do trabalho de graduação;

À UFSCar e professores do Departamento de Engenharia Química, por fornecerem acesso ao ensino de qualidade, bem transformador e não retirável.

RESUMO

Energia, ar e água são fatores primordiais à vida humana e no início da sociedade primitiva praticamente não tinham custos e limitações, por serem de fácil acesso e uso especialmente em atividades domésticas. Mas, em decorrências das evoluções alavancadas pela expansão da industrialização no final do século XVIII, o mundo teve a sua demanda energética aumentada. Em decorrência desse aumento do uso dos recursos naturais, houve a intensificação dos tipos de danos ao meio ambiente. Para reduzir os padrões atuais de produção e consumo de energia elétrica baseados em fontes fósseis, é preciso estimular o uso e o desenvolvimento de tecnologias que englobam energias renováveis. Os coletores solares, exemplos de fonte de energia fotovoltaica, foram estudados no presente Trabalho de Graduação como alternativa para melhoria de um sistema de aquecimento de água de processo em uma indústria de silicones de performance. Esse Trabalho de Graduação descreveu os problemas atuais do sistema de aquecimento de água utilizado, composto por resistências elétricas. Além disso, fez a modelagem térmica desse sistema através do balanço diferencial de energia. A partir do balanço diferencial, fez a análise de sensibilidade do sistema, variando parâmetros como o volume de água no tanque de aquecimento e a sua potência elétrica. Por fim, estudou a aplicação de coletores solares como alternativa para aumento da potência elétrica, incluindo a análise exérgica e econômica preliminar. Os resultados obtidos indicam que o sistema de aquecimento de água de processo atual possui um alto tempo para aquecimento de uma carga de 10000 kg até 75°C, sendo esse de 10 horas. Além disso, o aumento do volume do tanque de aquecimento não apresentou melhora no tempo de aquecimento do fluido no reator, sendo esse tempo também de 10 horas. Dobrar a potência do sistema de aquecimento para 108 kW apresentou um ganho expressivo no tempo de aquecimento do fluido na unidade produtiva, tendo uma diminuição de 60%. O uso de coletores solares como alternativa para aumentar a potência se mostrou positivo, tendo tempo de retorno do projeto de 6 anos e 9 meses, possibilitando um lucro anual de R\$ 9.956 e possuindo uma eficiência exérgica de 19,2%, maior que a eficiência exérgica do sistema com resistências elétricas, de 17,9%.

Palavras-chave: Sistema de aquecimento industrial. Coletores Solares. Sustentabilidade. Análise Exérgica de coletores solares.

ABSTRACT

Energy, air and water are primordial factors in human life and in the beginning of primitive society they had practically no costs and limitations, as they were easily accessible and used, especially in domestic activities. In the other side, because of the evolutions leveraged by the expansion of industrialization in the late eighteenth century, the world had its energy demand increased. As a result of this increased use of natural resources, there was an intensification of the types of damage to the environment. To reduce current patterns of electricity production and consumption based on fossil sources, it is necessary to encourage the use and development of technologies that include renewable energy. Solar collectors, examples of photovoltaic energy source, were studied in this Undergraduate Work as an alternative for improving a process water heating system in a performance silicone industry. This Undergraduate Work described the current problems of the water heating system utilized, which possess electrical resistances. In addition, it performed the thermal modeling of this system through the differential energy balance. From the differential balance, executed the sensitivity analysis of the system, varying parameters such as the volume of water in the heating tank and its electrical power. Finally, it studied the application of solar collectors as an alternative to increase the electrical power, including the preliminary exergy and economic analysis. The results obtained indicate that the current heating system has a long time for heating a load of 10000 kg up to 75°C, which is 10 hours. In addition, increasing the volume of the heating tank did not improved the heating time of the fluid in the reactor. However, doubling the system power to 108 kW presented a significant gain in heating time, with a 60% decrease. The use of solar collectors as an alternative to increase power proved to be positive, having a project payback time of 6 years and 9 months, annual profit of R\$ 9956 and a higher exergy efficiency (19,2%) when compared to the resistances system exergy efficiency (17,9%).

Keywords: Industrial heating system. Solar Collectors. Sustainability. Exergy analysis of solar collectors.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Classificação dos principais tipos de coletor solar	9
Figura 2	Coletor Solar de Tubo Evacuado	10
Figura 3	Representação esquemática do sistema de aquecimento atual de água de processo	12
Figura 4	Proposta de aquecimento de água de processo com aquecimento solar	15
Figura 5	Representação do sistema de aquecimento e reator na unidade produtiva	15
Figura 6	Gráfico dos perfis de temperatura ao longo do tempo para o cenário atual	27
Figura 7	Gráfico dos perfis de temperatura ao longo do tempo para o cenário 2	29
Figura 8	Gráfico dos perfis de temperatura ao longo do tempo para o cenário atual	32
Figura 9	Perfis de temperatura agrupados para os diferentes cenários analisados	33

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Padrão global de consumo de energia nas indústrias em 2006 e 2030	7
Tabela 2	Valores das variáveis do sistema de aquecimento atual	14
Tabela 3	Valores das variáveis do sistema de aquecimento para o cenário atual	25
Tabela 4	Valores da temperatura do Tanque de aquecimento (T) e líquido no interior do reator na área produtiva (Θ) ao longo do tempo para o cenário atual	26
Tabela 5	Valores das variáveis do processo para o cenário 2: Dobrar o volume do tanque de aquecimento	28
Tabela 6	Valores da temperatura do Tanque de aquecimento (T) e líquido no interior do reator na área produtiva (Θ) ao longo do tempo para o cenário 2	29
Tabela 7	Valores das variáveis para o cenário 3: Dobrar a resistência do tanque de aquecimento	30
Tabela 8	Valores da temperatura do Tanque de aquecimento (T) e líquido no interior do reator na área produtiva (Θ) ao longo do tempo para o cenário 3	31
Tabela 9	Cargas térmicas para aquecimento dos produtos produzidos na unidade produtiva estudada	35

LISTA DE SIGLAS

- ASME - American Society of Mechanical Engineers
- ETC - Evacuated Tube Collectors
- SHC - Solar Heating & Cooling Programme
- SHIP - Solar Heat for Industrial Process

LISTA DE SÍMBOLOS

θ	Temperatura no interior do reator na unidade produtiva [°C]
T	Temperatura no interior do tanque de aquecimento [°C]
M	Massa do tanque de aquecimento [kg]
M_r	Massa do reator de produção [kg]
c_p	Calor específico da água [kcal/°C/kg]
P	Potência das resistências [W]
\dot{m}	Vazão mássica [kg/s]
\dot{U}	Fluxo de energia Interna total [J/s]
\hat{U}	Energia interna específica [J/kg]
\dot{W}	Fluxo de trabalho total do sistema [J/s]
\dot{W}_s	Fluxo de trabalho de eixo [J/s]
\dot{W}_f	Trabalho de fluxo [kJ/s]
\dot{V}_j	Vazão volumétrica da j-ésima corrente de um sistema [m ³ /s]
\hat{V}_j	Volume específico [m ³ /kg]
\hat{H}	Entalpia específica [J/kg]
ΔU_{sis}	Varição de energia interna do sistema [J]
$\Delta E_{k,sis}$	Varição de energia cinética do sistema [J]
$\Delta E_{p,sis}$	Varição de energia potencial do sistema [J]
u	Velocidade do sistema [m/s]
g	Aceleração da gravidade [m/s ²]
z	Altura da corrente [m]
$\eta_{ex,col}$	Eficiência exergética do sistema com coletores solares [-]
$\eta_{ex,res}$	Eficiência exergética do sistema com resistências [-]
$\dot{E}x_{saída,f}$	Exergia de um fluido na condição de saída [kJ/s]
$\dot{E}x_{entrada,f}$	Exergia de um fluido na condição de entrada [kJ/s]
$\dot{E}x_{entrada,sol}$	Exergia da radiação solar [kJ/s]
$h_{saída}$	Entalpia na condição de saída do sistema [kJ/kg]
$h_{entrada}$	Entalpia na condição de entrada do sistema [kJ/kg]
$S_{saída}$	Entropia na condição de saída do sistema [kJ/kg.K]
$S_{entrada}$	Entropia na condição de entrada do sistema [kJ/kg.K]

MW_{th}

Megawatt Térmico [-]

\dot{Q}

Taxa de transferência de calor no sistema [kJ/s]

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	REVISÃO DE LITERATURA	3
2.1	AQUECEDORES INDUSTRIAIS	3
2.2	CALDEIRAS	4
2.3	O PROBLEMA NO CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA	6
2.4	A INTEGRAÇÃO DE ENERGIA SOLAR EM SISTEMAS INDUSTRIAIS	7
2.5	COLETORES SOLARES	8
2.6	COLETORES SOLARES TUBO EVACUADO	9
2.7	USO DE AQUECIMENTO SOLAR EM PROCESSOS INDUSTRIAIS (SHIP)	11
3	MATERIAIS E MÉTODOS	12
3.1	DESCRIÇÃO DO SISTEMA ATUAL	12
3.2	DESCRIÇÃO DO NOVO SISTEMA PROPOSTO COM COLETORES SOLARES	14
3.3	BALANÇO DE ENERGIA PARA O SISTEMA DE AQUECIMENTO ATUAL	15
3.3.1	Balanço De Energia Para O Volume De Controle 1	16
3.3.2	Balanço De Energia Para O Volume De Controle 2	20
3.4	ANÁLISE DE SENSIBILIDADE	20
3.4.1	Variação Do Volume Do Tanque De Aquecimento	21
3.4.2	Variação Da Potência Da Resistência Do Sistema De Aquecimento	21
3.5	ANÁLISE ECONÔMICA	21
3.6	ANÁLISE EXERGÉTICA	22
3.7	EQUAÇÃO NÃO-HOMOGÊNEA: MÉTODO DOS COEFICIENTES A DETERMINAR	25
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	25
4.1	CENÁRIO 1: SISTEMA ATUAL	25
4.2	CENÁRIO 2: ANÁLISE DE SENSIBILIDADE – DOBRAR O VOLUME DO TANQUE DE AQUECIMENTO	27
4.3	CENÁRIO 3: ANÁLISE DE SENSIBILIDADE – DOBRAR A POTÊNCIA DO SISTEMA DE AQUECIMENTO	30
4.4	ANÁLISE ECONÔMICA PRELIMINAR	34
4.5	ANÁLISE EXERGÉTICA PRELIMINAR	36
5	CONCLUSÃO	38
	REFERÊNCIAS	39
	APÊNDICE A – Resolução do balanço de energia para o cenário 1	42
	APÊNDICE B – Resolução do balanço de energia para o cenário 2	47

APÊNDICE C – Resolução do balanço de energia para o cenário 3	52
ANEXO A – Estimativa para implementação do sistema de aquecimento solar	57
ANEXO B – Propriedades da água saturada (líquido e vapor), entradas de temperatura	58

1 INTRODUÇÃO

Energia, ar e água são fatores primordiais à vida humana e no início da sociedade primitiva praticamente não tinham custos, por serem de fácil acesso e uso especialmente em atividades domésticas (GOLDEMBERG, LUCON, 2007). Mas, em decorrências das evoluções alavancadas pela expansão da industrialização no final do século XVIII, o mundo teve a sua demanda energética aumentada (CHOPRA, TYAGI, *et al.*, 2018). Em decorrência desse aumento do uso dos recursos naturais, houve a intensificação dos tipos de danos ao meio ambiente, tendo como exemplo danos a diferentes esferas do sistema terrestre, como a litosfera, hidrosfera e atmosfera (BRAGA; HESPANHOL; *et al.*, 2005). Esses impactos ambientais trazem problemas em diferentes âmbitos: local, com a poluição urbana do ar; regional, em decorrência da chuva ácida; e global, com o efeito estufa, desmatamento e degradação costeira e marinha (GOLDEMBERG; LUCON, 2012).

Para evitar os padrões atuais de produção e consumo de energia elétrica baseados em fontes fósseis, é preciso estimular o uso e o desenvolvimento de tecnologias que englobam energias renováveis (GOLDEMBERG; LUCON, 2007). A importância da utilização de energias renováveis se resume nas mesmas serem decorrentes de ciclos naturais de conversão da radiação solar, poderem ser consideradas inesgotáveis e não alterarem o balanço energético do planeta, resultando em um mínimo impacto no meio ambiente (PACHECO, 2006). O Brasil, por ter bons níveis de irradiação solar e disponibilidade de vento em variadas regiões, é uma potencial fonte de desenvolvimento de matriz energética renovável (FEITOSA, 2016). Algumas alternativas de energias renováveis que podem integrar essa matriz são a Energia Eólica, produzida a partir da variação do aquecimento das camadas do ar, a Energia de Biomassa, obtida a partir da combustão de matéria orgânica de origem vegetal ou animal e, por fim, a Energia Fotovoltaica, onde os fótons transportados com a luz são absorvidos por materiais semicondutores contidos em placas fotovoltaicas (coletores solares).

Os coletores solares estão disponíveis no mercado de diferentes formas e tem o uso tanto na classe industrial e comercial, quanto na classe residencial. Como definição, são trocadores de calor capazes de transformar radiação solar em calor, que então é transferido para um fluido térmico (KALOGIROU, 2014). No presente

trabalho, será avaliado o uso de coletores solares de tubo a vácuo por se tratar de uma análise na classe industrial e este trocador ser reconhecido nas referências como o mais eficiente e conveniente, ter pequena perda de carga e alta transferência térmica (SABIHA *et al.*, 2014).

O relatório com o histórico anual de consumo de Energia Elétrica de 1995 a 2019, disponibilizado pela Empresa de Pesquisa Energética – EPE, mostra que a classe industrial é responsável, em média, por 44% do consumo de energia elétrica no Brasil. Somado a isso, o desenvolvimento de legislações ambientais mais rígidas, e o estabelecimento de tratados mundiais, como o Protocolo de Kyoto, fizeram com que houvesse um apelo sustentável pelas indústrias. Sendo assim, é papel dessas organizações, como agentes que usufruem dos recursos existentes, se preocupar com as necessidades da geração presente sem afetar as gerações futuras, colaborando para o desenvolvimento sustentável (SILVEIRA; PETRINI, 2018). Alinhado a esses conceitos, a indústria química onde será avaliada o uso dos coletores solares neste trabalho definiu metas de sustentabilidade como um de seus objetivos, desejando alcançar a neutralidade de carbono até 2050 e, fazendo parte dessa jornada de sustentabilidade, se encontra o projeto que aqui está sendo avaliado.

O sistema atual de aquecimento de água de processo estudado nesse trabalho não é capaz de satisfazer todas as necessidades de aquecimento e o sistema de coletores solares pode melhorar a sua eficácia, além de ser mais sustentável. Em sua capacidade atual não é possível utilizá-lo simultaneamente em duas unidades produtivas e o tempo necessário para aquecer o fluido à temperatura demandada pelo processo é alto, gerando problemas relacionados a produtividade e aumento de custos operacionais fixos.

Desta forma, o objetivo deste Trabalho de Graduação é descrever e analisar os problemas atuais do sistema de aquecimento de água de processo em uma indústria de silicões de performance, fazer a modelagem térmica desse sistema através do balanço diferencial de energia e, a partir do balanço diferencial, fazer a análise de sensibilidade do sistema, variando parâmetros como o volume de água no tanque de aquecimento e a sua potência elétrica. Por fim, fazer o estudo da aplicação de coletores solares como alternativa sustentável para aumento da potência elétrica, incluindo a análise exergética e econômica preliminar.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 AQUECEDORES INDUSTRIAIS

Para o aquecimento de fluidos, como a água, gases e ambientes podem ser utilizados aquecedores industriais, sendo as suas características e particularidades, como tamanho e tipo, relacionadas às demandas de cada empresa. Em relação às suas classificações, dentre as existentes podemos citar as relacionadas à disposição do aquecedor e ao seu princípio de funcionamento (CREDER, 2006).

Em relação a classificação por disposição do aquecedor, o mesmo pode ter uma disposição central, onde o aquecimento do fluido ocorre dentro de um único local e então é destinado aos pontos de demandas por tubulações dedicadas. Além disso, a disposição pode ser especificamente em um ponto de aquecimento, onde o fluido é aquecido próximo de onde será utilizado (IMC RESISTÊNCIAS, 2021; COREL RESISTÊNCIAS ELÉTRICAS, 2021).

Em relação a classificação por princípio de funcionamento, essa pode ser dividida entre aquecedores de passagem e aquecedores de acumulação.

Os aquecedores de passagem são aqueles em que o fluido passa por uma serpentina que está exposta a uma fonte de calor. Nesse, o gatilho de funcionamento é baseado na demanda, onde, normalmente, o fluido passa pelo sistema somente quando demandado por algum ponto de utilização. As fontes de calor nesse caso podem ser fornalhas, câmara de combustão, energia elétrica e solar. Para a energia solar, a instalação do sistema é feita de maneira a priorizar a maior incidência de radiação solar, como por exemplo instalação em telhados. Sua vantagem, quando comparado aos aquecedores de acumulação, é a não necessidade de reservatório. No entanto, como limitação, geralmente atende um número limitados de pontos dentro de uma unidade (IMC RESISTÊNCIAS, 2021; COREL RESISTÊNCIAS ELÉTRICAS, 2021).

Os aquecedores de acumulação, ao contrário dos aquecedores de passagem, possuem um reservatório, que usualmente são tanques ou cilindros, para armazenamento de um volume de fluido aquecido. Esse aquecimento acontece pela troca térmica com aquecedores de passagem, queimadores mecânicos ou

serpentinhas, sendo o volume estabelecido de acordo com as necessidades da unidade. As fontes de calor também podem ser provenientes da energia solar, elétrica e da conversão de energia química em energia térmica através da combustão de combustíveis líquidos, gasosos e carvões. Como vantagem para os aquecedores de acumulação, o sistema funciona de forma contínua, sempre mantendo uma quantidade razoável de fluido disponível, permitindo que este atenda diferentes pontos de consumo e alta demanda. Além disso, mantém o fluido na temperatura programada. Como desvantagem, a necessidade de reservatório representa um aumento expressivo no investimento necessário e demanda um espaço maior para a instalação (IMC RESISTÊNCIAS, 2021; COREL RESISTÊNCIAS ELÉTRICAS, 2021).

Os aquecedores elétricos podem ser encontrados no mercado em diferentes modelos e sistemas, abrangendo também os sistemas de passagem e acumulação, sendo esse último popularmente denominado caldeira (IMC RESISTÊNCIAS, 2021; COREL RESISTÊNCIAS ELÉTRICAS, 2021).

2.2 CALDEIRAS

As caldeiras são vasos de pressão utilizados para aquecer água ou produzir vapor, tendo principal uso no fornecimento de instalações de aquecimento para indústrias e geração de energia através de turbinas a vapor. Podem ser classificadas em: aquotubulares, flamotubulares e elétricas (ZARPELON, AZZOLINI, 2015; BARMA et al., 2017).

A caldeira flamotubular foi o primeiro tipo de caldeira a ser construído. Tem como característica a sua construção simples, sendo composta por um cilindro externo que contém água e um cilindro interno destinado à fornalha. Seu uso aparece com maior frequência em aplicações de pequena capacidade de produção de vapor, em torno de 10 toneladas/hora, e baixas pressões (até 10 bar). Em contrapartida, as caldeiras aquotubulares representam o modelo mais moderno para geração de vapor. Nesse modelo, a água circula no interior dos tubos e absorve o calor resultante de gases de combustão que circulam externamente a esses tubos através do caminho gerado pela alvenaria e chicanas internas. Além disso, atinge pressões e temperaturas mais elevadas quando comparada a outros tipos de caldeiras (BAZZO, 1995).

As caldeiras elétricas podem ser definidas como um vaso que contém água e uma fonte de calor eletricamente energizada, sendo inicialmente divididas entre caldeiras elétricas com eletrodos e com resistências. De acordo com Wallace e Spielvogel (1974), as caldeiras elétricas com resistências possuem como elemento de aquecimento um tubo de cobre dobrado em forma de grampo, que é preenchido por um fio de níquel-cromo, e cercado por isolamento elétrico. A passagem de corrente através do fio produz calor e então esse tubo é imergido na água a ser aquecida e o calor é dissipado para a mesma.

Normalmente essas caldeiras são construídas seguindo normas, como a American Society of Mechanical Engineers (ASME), de maneira a garantir e prevenir riscos relacionados a explosão de tanques, e o seu exterior é protegido com revestimento térmico para diminuir perdas de calor para o ambiente. Além disso, geralmente o sistema contém dispositivos de controle e de segurança, como válvulas de segurança e dispositivos para conter riscos relacionados a condições com baixo volume de água, que interrompem o fornecimento de energia elétrica em situações onde o nível de água é menor que o nível mínimo de segurança (WALLACE, SPIELVOGEL, 1974). O sistema conta também com uma bomba de alimentação, que no geral é uma bomba centrífuga.

O funcionamento das caldeiras elétricas com resistência é simples, sendo necessário um cuidado especial em relação ao nível de água no tanque, especialmente quando ligando o equipamento. As operações de manutenção são esperadas que sejam mínimas pela não necessidade de alguns acessórios como monitores de chama, indicador de temperatura do gás de combustão que está saindo dos geradores de vapor e reguladores de pressão quando comparados a outros tipos de caldeiras. Além disso, possuem um baixo custo fixo quando comparado a caldeiras a gás, menores custos de instalações por não requisitarem equipamentos reservas e de ventilação (JUNGE, 2009; WALLACE, SPIELVOGEL, 1974).

Em contrapartida, segundo Junge (2009, p. 1), “[...] argumentos contrários as caldeiras elétricas são baseados em três conceitos amplamente aceitos”:

- A eletricidade utilizada para fornecer energia aos sistemas são geradas por processos que poluem tanto quanto as caldeiras a gás. No Brasil, no entanto, essa informação não é verdadeira pois, ao contrário da maioria dos países desenvolvidos que utilizam carvão e gás em termoelétricas, 83% da

eletricidade vem de fonte renovável (EPE [Empresa de Pesquisa Energética] Balanço Energético Nacional (BEN) 2020: Relatório Síntese / Ano base 2019);

- Eletricidade é uma utilidade cara e tem a tendência de ter o seu preço aumentando ao longo do tempo;
- Eletricidade pode não ser confiável, especialmente durante quedas de energia.

2.3 O PROBLEMA NO CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA

O consumo de energia tem se tornado um problema, especialmente em decorrência do rápido aumento de sua demanda nas últimas décadas. Somado a isso, os problemas ambientais como mudança climática e aquecimento global forçam a humanidade a buscar por fontes alternativas e renováveis de geração de energia para diminuir o consumo das fontes convencionais. Em 2011, as fontes convencionais representavam 80% do consumo global de energia. Fontes de energia renováveis como solar, eólica e biomassa são exemplos de alternativas livres de emissão de CO₂ e que são promissoras por possibilitar a modificação do padrão de consumo de energia da indústria global. Além disso, discutir e aprimorar a energia no setor industrial é de extrema importância, considerando que este setor representa 50% do consumo de energia no mundo. No entanto, apesar do conhecimento e reconhecimento geral da importância das fontes renováveis de energias, estas representavam apenas 1,6% do padrão de consumo da indústria global em 2006 e a tendência é subir para 1,8% até 2030 (S. Mekhilef *et al.*, 2011). A Tabela 1 apresenta o padrão global de consumo de energia nas indústrias em 2006 e 2030.

Tabela 1 – Padrão global de consumo de energia nas indústrias em 2006 e 2030

Tipos de energia	2006 (%)	2030 (%)
Líquidos	34.6	28.6
Gás Natural	24.1	25.6
Carvão	24.8	24.3
Eletricidade	14.9	19.7
Renováveis	1.5	1.8

Fonte: Adaptado de S. Mekhilef *et al.*, 2011

2.4 A INTEGRAÇÃO DE ENERGIA SOLAR EM SISTEMAS INDUSTRIAIS

Dentre as fontes de energia renovável, a energia solar se apresenta como um destaque e opção promissora para o setor industrial por ser abundante, grátis e limpa. As aplicações de energia solar na indústria são divididas em dois grupos principais: A energia solar térmica e a energia fotovoltaica (S. Mekhilef *et al.*, 2011).

Segundo S. Mekhilef *et al.* (2011), para a energia solar térmica, “[...] as principais aplicações envolvem o aquecimento de água, produção de vapor, processos de secagem e desidratação, pré-aquecimento, pasteurização, esterilização, limpeza, lavagem [...]”, dentre outras.

Como alternativa para endereçar, por exemplo, as desvantagens relacionadas as caldeiras elétricas que tangem os problemas de poluição e o custo da eletricidade, se tem a possibilidade de integração de energia solar nesses sistemas industriais. Dentre os sistemas de energia renovável, a energia solar térmica é considerada a alternativa mais econômica e tipicamente se tem a utilização de coletores solares para coletar e armazenar radiação solar e utilizá-la para aquecer a água para uso doméstico, comercial e em plantas industriais (S. Mekhilef *et al.*, 2011).

A indústria de aquecimento solar da água, tanto para fins doméstico, quanto industriais, representa a principal aplicação da energia solar térmica. Esses sistemas de aquecimento de água utilizam a tecnologia da energia solar térmica, ou seja, a conversão da radiação solar em calor para aquecer fluidos, e geralmente são considerados como uma opção viável para substituir aquecedores de água baseados

em combustíveis fósseis e eletricidade. Esse sistema está em um estágio maduro e são comercializados em muitos países do redor do mundo, tendo a sua utilização crescido em uma taxa de 30% ao ano desde 1980 (JAMAR *et al.*, 2016; LANGNISS, 2004; S. Mekhilef *et al.*, 2011).

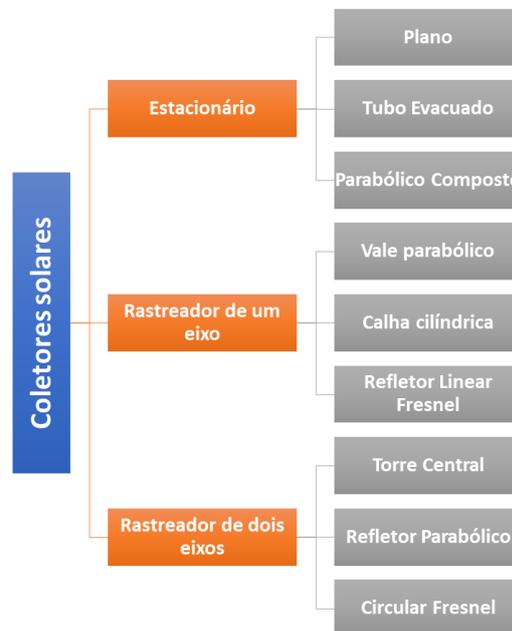
Para a sua definição, geralmente os sistemas de aquecimento solar da água são constituídos por coletores solares e um tanque de armazenamento. Estes ainda podem ser classificados entre sistemas passivos e ativos. Em relação ao sistema de aquecimento solar da água passivo, este depende da convecção acionada pelo calor para fazer a circulação do fluido a ser aquecido. Já o sistema ativo, em uma definição simplista, utiliza bombas elétricas, válvulas e controladores para circular a água ou qualquer outro fluido de trabalho do sistema (JAMAR *et al.*, 2016; SHUKLA, 2013).

2.5 COLETORES SOLARES

Os coletores solares são dispositivos que convertem a irradiação solar que atinge a sua superfície em calor através do aquecimento de um meio de transporte de calor adequado, denominado absorvedor. Essa energia térmica é armazenada e levada por um fluido em movimento, que então é utilizado para uma aplicação específica (S. Suman *et. al*, 2015; Horta, 2015).

Eles podem ser classificados como coletor solar estacionário, sendo estes mantidos fixos, ou rastreador, que tem como característica rastrear o movimento do sol de forma a garantir que a radiação solar incidente sempre esteja perpendicular a ele. O coletor rastreador pode ser dividido, ainda, entre rastreador de um eixo e dois eixos. O coletor estacionário é categorizado entre plano, tubo evacuado e parabólico composto. Em relação aos coletores solares rastreadores de um eixo, tem-se na sua composição o coletor solar de vale parabólico, coletor de calha cilíndrica e o refletor linear Fresnel. Para os rastreadores de dois eixos, tem-se o receptor de torre central, refletor parabólico e circular Fresnel (S. Suman *et. al*, 2015). Para melhor entendimento da classificação, a Figura 1 apresenta um resumo da classificação dos principais tipos de coletor solar.

Figura 1 – Classificação dos principais tipos de coletor solar



Fonte: Adaptado de S. Suman *et. al*, 2015

2.6 COLETORES SOLARES TUBO EVACUADO

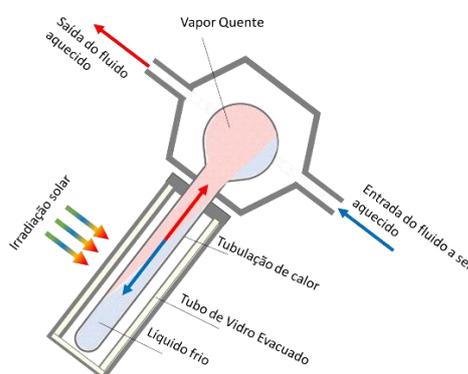
Os coletores solares Tubo Evacuado, do inglês Evacuated Tube collectors (ETC), possuem a maior utilização em instalações térmicas globalmente (Sharma e Pathak, 2016). De acordo com o relatório de 2020 do Solar Heating & Cooling Programme (SHC) da agência internacional de energia, eles representavam 70,5% da quota de coletores de solares para aquecimento de água em operação em 2018. Sharma e Pathak (2016) relatam que as principais vantagens dos ETC são a sua faixa de operação entre 50 – 200 °C, que é mais ampla que outros tipos de coletores solares, e possuem uma maior eficiência térmica, principalmente quando comparados aos coletores planos, sendo relatados em estudos de campo uma eficiência de 46,7% para os coletores planos e 60,7% para o Tubo Evacuado. Neste trabalho será avaliado a utilização do ETC, como substituto as resistências elétricas durante o período de sol, no sistema de aquecimento de água de processo da indústria de silicone de performance.

O ETC consiste em dois tubos concêntricos, sendo o tubo externo separado do tubo interno por vácuo. Ele possui uma tubulação de calor (heat pipe) mantida dentro de um invólucro de vidro sendo que, durante o seu funcionamento, a tubulação de

calor utiliza um líquido como, por exemplo, água, etanol e metanol para capturar o calor da irradiação solar. Para o sistema adotado no presente trabalho esse fluido é a água. A irradiação solar é então transferida por meio desse líquido para qualquer outro fluido de trabalho que se deseja aquecer enquanto ocorrem ciclos de evaporação e condensação. De forma mais detalhada, ao receber a irradiação solar, o líquido que está no interior da tubulação de calor passa por mudanças de fases e é convertido em vapor e, por questões de fluabilidade, é direcionado para a parte superior do tubo. Ao trocar calor com o fluido de trabalho a ser aquecido, o mesmo perde temperatura, é condensado, retorna ao estado líquido e, por gravidade, é direcionado ao fundo do tubo, dando continuidade ao ciclo (S. Suman *et. al*, 2015). A Figura 2 representa de forma esquemática o funcionamento de um coletor ETC.

A característica que determina o nome do equipamento, o invólucro de vidro ser evacuado, tem a finalidade de minimizar a perda de calor por convecção interna, por não ter essa possibilidade no vácuo, e prevenir degradação climática dos componentes internos do coletor. Em adição, é comum aplicar vácuo dentro do tubo de aquecimento para possibilitar a mudança de fase do líquido interno em baixas temperaturas. Usualmente não se tem cenários onde apenas um único coletor EPC é instalado, sendo geralmente o número de coletores integrados (JAFARKAZEMI, AHMADIFARD e ABDI, 2016; S. Suman *et. al*, 2015).

Figura 2 – Coletor Solar de Tubo Evacuado



Fonte: Adaptado de S. Suman *et. al*, 2015

2.7 USO DE AQUECIMENTO SOLAR EM PROCESSOS INDUSTRIAIS (SHIP)

O aquecimento solar em processos industriais, do inglês Solar Heat for Industrial Process (SHIP), ainda é um processo nichado, no entanto nos últimos anos vem sido reportado a implementação de projetos que variam de escala pequena a grande em plantas industriais. Em abril de 2016 haviam sido reportados 188 aplicações de SHIP globalmente, o que representa uma área instalada de 154.500 m² e capacidade instalada de 107 megawatt térmico (MW_{th}). Dessas aplicações, 21 delas representavam sistemas que ultrapassavam 0,7 MW_{th} (>1000 m²) de capacidade térmica, 35 tinham capacidade entre 0,35 e 0,7 MW_{th} (500 - 1000 m²), 86 tinham capacidade entre 0,07 e 0,35 MW_{th} (100 - 500 m²), enquanto as 46 aplicações restantes se enquadravam em uma capacidade térmica menor que 0,07 MW_{th} e representavam uma área instalada menor que 100 m² (T. jia *et al.*, 2018).

A maior aplicação de aquecimento solar para processo industrial iniciou-se em junho de 2013 no Chile. Uma companhia denominada Codelco instalou uma aplicação com capacidade térmica de 27.5 MW_{th}, ocupando uma área de 39,300 m² com coletores solares de placa plana, a ser utilizado para atender 85% da demanda de calor de um processo de refino de cobre (T. jia *et al.*, 2018).

Outros exemplos de grandes aplicações de SHIP no mercado são a instalação de uma aplicação nos EUA em 2012 com capacidade térmica de 5.5 MW_{th}, representando uma área de 7804 m², em uma planta de processamento de aves. Além disso, a Malásia iniciou um programa em 2014 e realizou, até 2018, 10 grandes projetos de plantas solares para a indústria. Em relação ao Brasil, em 2014 os produtores de coletores solares brasileiros haviam vendido 17% da sua produção para aplicações industriais. Em adição, o cenário energético brasileiro, onde se tem um aumento da demanda energética, mas limitado fornecimento de energia, tem a tendência de aumentar os seus preços, o que torna ainda mais atrativo o investimento em tecnologias de aquecimento solar (T. jia *et al.*, 2018).

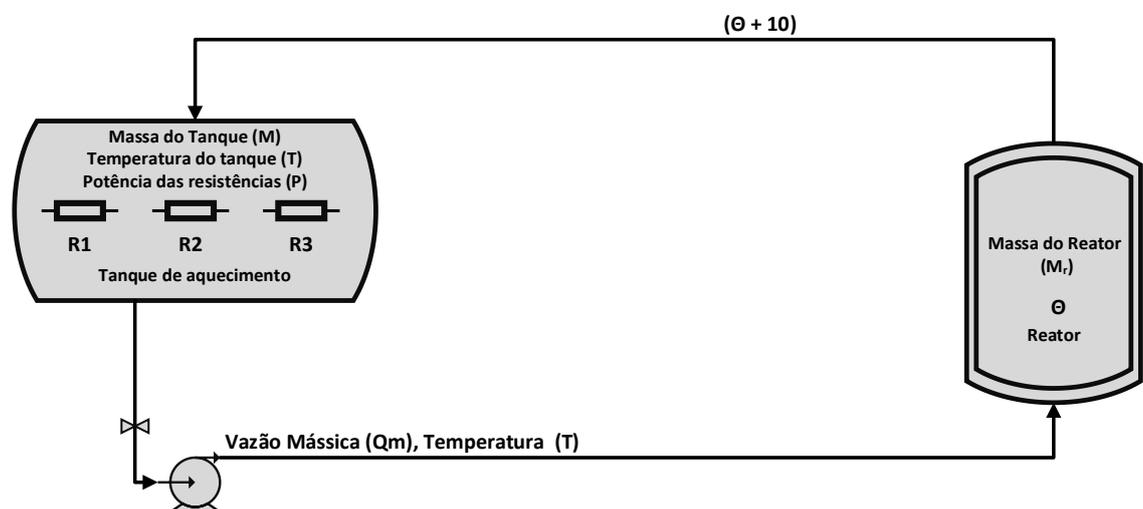
3 MATERIAIS E MÉTODOS

A seguir será apresentado a descrição do sistema atual de aquecimento de água de processo, o sistema proposto com a integração de coletores solares como alternativa para aumento da potência, o balanço de energia, a análise de sensibilidade, a análise econômica e exérgica e o método adotado para resolução da equação não-homogênea resultante do balanço de energia.

3.1 DESCRIÇÃO DO SISTEMA ATUAL

Para melhor entendimento do sistema atual de aquecimento de água de processo da indústria de silicone de performance aqui estudada, a Figura 3 apresenta a sua representação esquemática.

Figura 3 – Representação esquemática do sistema de aquecimento atual de água de processo



Fonte: elaborada pelo Autor

O tanque de aquecimento de água de processo tem o formato cilíndrico e a sua posição dentro da unidade produtiva é horizontal. Ele tem o volume útil de 15 m^3 e o seu material de construção é aço ASTM A-285. Além disso, conta com revestimento térmico de lã de vidro de 80 mm e, para o aquecimento, três resistências de 18 kW,

que totalizam a uma potência total do sistema de 54 kW. A finalidade do tanque de aquecimento é fazer o pré-aquecimento dos reatores de produção.

Para fazer a transferência da água aquecida para a camisa do reator na unidade produtiva, o sistema conta com uma bomba centrífuga, tendo uma rotação do motor de 1750 rpm, pressão de trabalho de 3,5 kgf/cm² (~3,43 bar) e vazão de trabalho de 3,6 m³/h. A tubulação é isolada termicamente com a utilização de lã de vidro de 80 mm e tem o diâmetro de 1½ polegadas.

O sistema conta também com um controlador que tem a ação Liga-Desliga, onde a resistência é ligada quando a temperatura da água no interior do tanque está abaixo do setpoint de 96°C, e desligada após atingir o objetivo.

O reator na área produtiva tem o volume de trabalho de 10 m³, a sua posição é vertical e o material de construção aço ASTM A-285. O reator conta com uma camisa externa, utilizada durante processos de aquecimento e resfriamento, que recebe a água quente do sistema de aquecimento descrito anteriormente, quando demandada. A água quente na camisa troca calor com o fluido que está dentro do reator, sendo esse o material a ser produzido, e então retorna, com uma temperatura reduzida, para o tanque de aquecimento que contém as resistências.

Pela falta de instrumentações na unidade do sistema de aquecimento de água, não é possível determinar a temperatura da água que retorna ao sistema de aquecimento após trocar calor com o fluido no reator de produção. Sendo assim, adotou-se que a temperatura é 10°C acima da temperatura do fluido dentro do reator, tendo como objetivo garantir o funcionamento do princípio de transferência de calor, que é a diferença de temperatura.

Portanto, será adotado que a temperatura no interior do reator de produção é a variável Θ , e a temperatura de retorno ao tanque de aquecimento $\Theta+10^{\circ}\text{C}$, como apresentado na Figura 3. Na Tabela 2 são apresentados os valores das variáveis do sistema de aquecimento atual.

A temperatura exigida pelo processo produtivo para o fluido no interior do tanque de aquecimento (Θ) é de 75°C, sendo essa a temperatura monitorada na análise de sensibilidade do sistema durante o presente trabalho.

O reator da unidade produtiva estudada é utilizado para a produção de seis produtos de interesse, que serão denominados no presente trabalho como Produto A, Produto B, Produto C, Produto D, Produto E e Produto F, sendo esses produzidos em

diferentes bateladas ao longo do ano de acordo com um volume anual de vendas.

Tabela 2 – Valores das variáveis do sistema de aquecimento atual

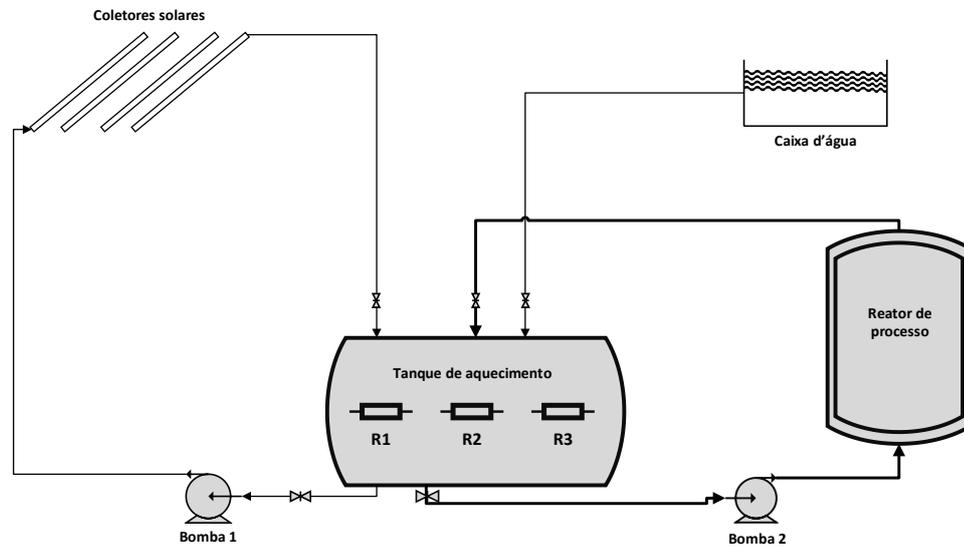
Variável	Valor	Unidade
Massa do tanque de aquecimento (M)	15.000	kg
Massa do reator de produção (m_r)	10.000	kg
Calor específico da água (c_p)	1	kcal/°C/kg
Potência das resistências (P)	54	kW
Vazão da bomba (\dot{m})	3.600	kg/h

Fonte: elaborada pelo autor.

3.2 DESCRIÇÃO DO NOVO SISTEMA PROPOSTO COM COLETORES SOLARES

Para a análise do cenário de aumento da potência do sistema de aquecimento, estudou-se a aplicação de coletores solares de tubo evacuado (ETC) ao invés da utilização de resistências elétricas, seguindo o esquema apresentado na Figura 4. Nela, se considera a utilização de um sistema de aquecimento solar ativo dimensionado para uma potência de 108 kW, com a adição de uma bomba centrífuga para a circulação da água nos coletores solares, que então é reenviada para o tanque de aquecimento. Esse sistema conta ainda com as três resistências presentes no sistema atual, a ser utilizada em momentos em que o sistema de coletores solares não atende à demanda.

Figura 4 – Proposta de aquecimento de água de processo com aquecimento solar

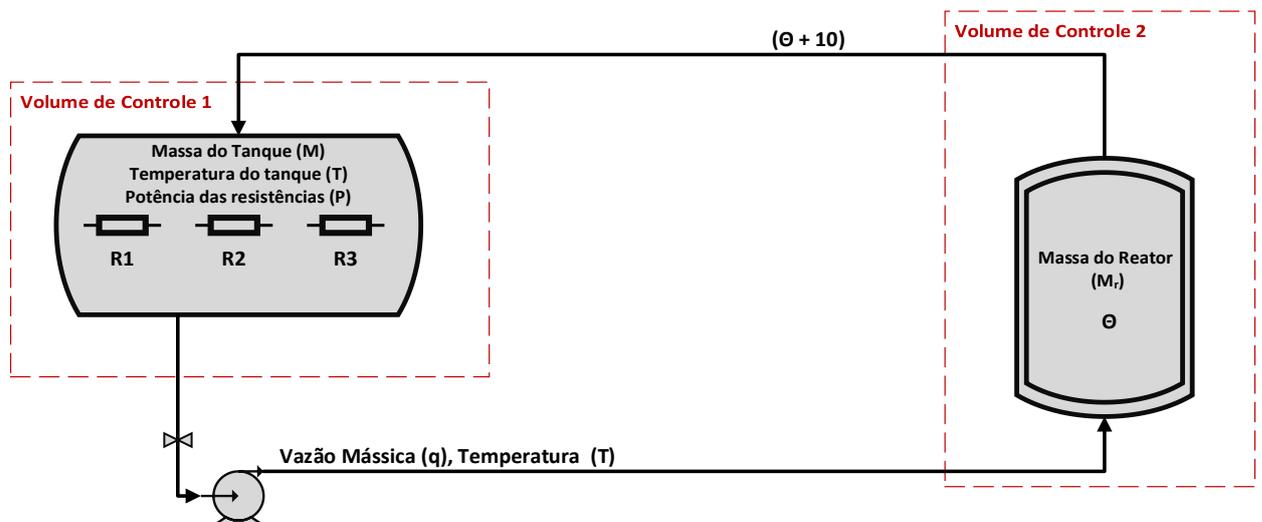


Fonte: elaborada pelo Autor.

3.3 BALANÇO DE ENERGIA PARA O SISTEMA DE AQUECIMENTO ATUAL

Na Figura 5 é apresentado o sistema de aquecimento atual e os volumes de controle utilizados para o balanço de energia.

Figura 5 – Representação do sistema de aquecimento e reator na unidade produtiva



Fonte: elaborada pelo autor.

A primeira lei da termodinâmica, também conhecida como o princípio de conservação de energia, diz, baseando-se em observações experimentais, que a energia não pode ser criada e nem destruída, pode ser apenas transformada. Ela nos fornece a possibilidade de estudar sobre as diferentes formas de energia e suas interações. Uma das grandes consequências da primeira lei é a existência e definição da propriedade denominada energia total (Çengel, 2012).

Fazendo-se o uso das discussões decorrentes dessas definições, o princípio de conservação de energia pode ser expresso de maneira a representar a relação entre o total de energia entrando e saindo de um sistema durante um processo. Essa relação é denominada balanço de energia e é aplicável a qualquer sistema que esteja sob qualquer processo.

Dessa forma, com a intenção de estudar o sistema de aquecimento de água industrial da indústria de silicones de alta performance e as melhorias propostas, foram feitos os balanços de energia nos volumes de controle de interesse.

3.3.1 Balanço De Energia Para O Volume De Controle 1

Segundo Felder (2017) a equação geral do balanço, que estrutura o balanço de uma quantidade conservada em um sistema, pode ser escrito como:

$$\textit{Entrada} + \textit{Geração} - \textit{Saída} - \textit{Consumo} = \textit{Acúmulo} \quad (1)$$

Levando em consideração o princípio fundamental do balanço de energia, a lei de conservação de energia, os termos de geração e consumo podem ser desconsiderados do balanço, pois não há a possibilidade de se criar ou destruir energia. Tem-se, então, que:

$$\textit{Entrada} - \textit{Saída} = \textit{Acúmulo} \quad (2)$$

Onde “Entrada” representa a taxa total de transporte de energias cinética, potencial e interna para todas as correntes que entram no sistema, mais a taxa de transferência de calor, e “Saída” representa a taxa total de transporte de energia pelas correntes que saem do processo mais a taxa de transferência de energia na forma de

trabalho. Essa variação de energia do sistema representa a soma das energias microscópicas, relacionadas a estrutura molecular do sistema, e as macroscópicas, que englobam a movimentação e a influência de fatores externos como gravidade, magnetismo, eletricidade e tensão superficial (Çengel, 2012).

Para explicação, adota-se que o calor, fonte de energia resultante da diferença de temperatura entre o sistema e a sua vizinhança, é positivo quando transferido da vizinhança para o sistema e o trabalho, fonte de energia resultante de qualquer força motriz que não a diferença de temperatura, é positivo quando exercido pelo sistema sobre a vizinhança (Felder, 2017).

A taxa de transporte de energia interna total do material (\dot{U}) pode ser expressa como uma relação entre a sua vazão mássica (\dot{m}) e energia interna específica (\hat{U}), apresentada na Equação 3.

$$\dot{U} = \dot{m} \cdot \hat{U} \quad (3)$$

E o trabalho total feito pelo sistema sobre as vizinhanças, \dot{W} , pode ser destrinchado entre trabalho de eixo (\dot{W}_s) e trabalho de fluxo (\dot{W}_f).

$$\dot{W} = \dot{W}_s + \sum_{\text{correntes de saída}} P_j \dot{V}_j - \sum_{\text{correntes de entrada}} P_j \dot{V}_j \quad (4)$$

Em que \dot{V}_j é a vazão volumétrica da j-ésima corrente e P_j a pressão dessa corrente ao cruzar as fronteiras do sistema. \dot{V}_j pode ainda ser escrita como uma relação entre a vazão mássica e volume específico (\hat{V}_j), da seguinte maneira:

$$\dot{V}_j = \dot{m}_j \cdot \hat{V}_j \quad (5)$$

Dessa forma, a Equação 4 pode ser reescrita como:

$$\dot{W} = \dot{W}_s + \sum_{\text{correntes de saída}} \dot{m}_j \cdot \hat{V}_j P_j - \sum_{\text{correntes de entrada}} \dot{m}_j \cdot \hat{V}_j P_j \quad (6)$$

A entalpia é uma propriedade importante no balanço de energia para sistemas

abertos e pode ser explicitada pela relação entre a energia interna específica, a pressão e o volume específico.

$$\hat{H} = \hat{U} + P\hat{V} \quad (7)$$

Aplicando as Equações 6 e 7 e simplificando o balanço para o sistema estudado, onde se tem apenas uma corrente de entrada e saída, e considerando um pequeno intervalo de tempo de t até $t+\Delta t$, no qual as propriedades das correntes de entrada e saída podem ser consideradas constantes, os termos da Equação 2 podem ser explicitados por:

$$\text{Acúmulo} = \Delta E_{sis} = \Delta U_{sis} + \Delta E_{k,sis} + \Delta E_{p,sis} \quad (8)$$

Onde ΔU_{sis} representa a variação de energia interna do sistema, $\Delta E_{k,sis}$ a variação de energia cinética e $\Delta E_{p,sis}$ a variação de energia potencial do sistema.

$$\text{Entrada} = \dot{m}_{entrada} \left(\hat{H}_{entrada} + \frac{u_{entrada}^2}{2} + gz_{entrada} \right) \Delta t + \dot{Q} \Delta t \quad (9)$$

$$\text{Saída} = \dot{m}_{saída} \left(\hat{H}_{saída} + \frac{u_{saída}^2}{2} + gz_{saída} \right) \Delta t + \dot{W}_s \Delta t \quad (10)$$

Onde $\dot{m}_{entrada}$ e $\dot{m}_{saída}$ representam, respectivamente, as vazões mássicas das correntes de entrada e saída do sistema, u a velocidade, g aceleração da gravidade, z a altura da corrente e \dot{Q} a taxa de transferência de calor no sistema estudado.

Considerando também que não há mudança de velocidade e elevação durante o processo, os termos de energia cinética e potencial podem ser desconsiderados. Além disso, o tanque de aquecimento de água possui revestimento térmico de lã de rocha, o que permite assumir que a taxa de transferência de calor entre o volume de controle e a vizinhança é muito baixa, podendo ser desconsiderada. Além disso, utilizou-se a variação de entalpia do sistema como a aproximada dada pela relação entre o calor específico do fluido (c_p) e a sua variação de temperatura.

Substituindo as Equações 8, 9 e 10 na Equação 2, levando em conta as

considerações mencionadas anteriormente e dividindo por Δt , tem-se o balanço diferencial de energia para o volume de controle 1 representado na Equação 11.

$$\frac{dU_{sis}}{dt} = \dot{m}(\hat{H}_{entrada} - \hat{H}_{saída}) - \dot{W}_s \quad (11)$$

Para dar continuidade às análises, considerou-se também que a temperatura e a composição da água no interior do tanque de aquecimento não variam com a posição, sob a premissa de que o tanque está perfeitamente misturado. Além disso, assumiu-se que não ocorrem reações químicas e mudanças de fase dentro do sistema, por se tratar apenas de tanque com água, e sistema de controle com setpoint de 94°C, o que impede com o fluido atinja sua temperatura de ebulição. Assumiu-se também que energia interna e a entalpia específica são independentes da pressão e a capacidade calorífica não varia com o tempo.

Obtém-se, então, o balanço de energia da seguinte forma:

$$M C_v \frac{dT}{dt} = \dot{m} C_p (T_{entrada} - T) + \dot{W} \quad (12)$$

Em que M representa a massa total no interior do tanque de aquecimento e \dot{W} foi considerado negativo, invertendo o sinal do balanço, pois, aqui, está se considerando o trabalho das resistências elétricas que aquecem a água no interior do tanque.

Rearranjando os termos e assumindo, por falta de instrumentação para medição em campo, que a temperatura da corrente de retorno está, no mínimo dez graus acima da temperatura do interior do reator ($\theta + 10$) como explicado anteriormente e que os termos C_p e C_v são aproximadamente iguais para um líquido, tem-se:

$$\frac{dT}{dt} = -\frac{\dot{m}}{M} T + \frac{\dot{m}}{M} (\theta + 10) + \frac{\dot{W}}{M c_p} \quad (13)$$

3.3.2 Balanço De Energia Para O Volume De Controle 2

Para a realização do balanço diferencial de energia do volume de controle 2, ou seja, para o balanço no reator localizado na área produtiva, tem-se que:

$$\Delta E_{sistema} = \dot{Q}_{in} - \dot{W}_{out} = \Delta \dot{U} + \Delta \dot{E}_c + \Delta \dot{E}_p \quad (14)$$

Fazendo o uso das considerações descritas durante o desenvolvimento do balanço de energia para o volume de controle 1 e tendo em vista que o reator da unidade produtiva também possui um revestimento térmico, que não há mudança de velocidade e elevação durante o processo, os termos do balanço referentes a taxa de transferência de calor entre o volume de controle e a vizinhança, a energia cinética e a energia potência podem ser desprezados. Acrescentando a isso, pelo fato de o reator não possuir dispositivo para geração de energia, o termo de trabalho também pode ser desconsiderado. Por fim, o balanço se torna:

$$\frac{dU_{sis}}{dt} = \dot{m}(\hat{H}_{entrada} - \hat{H}_{saída}) \quad (15)$$

Fazendo-se o uso das considerações aplicadas para o volume de controle 1, tem-se a equação do balanço diferencial para o volume de controle 2:

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{\dot{m}}{M_r} T - \frac{\dot{m}}{M_r} (\theta + 10) \quad (16)$$

Em que M_r representa a massa do reator localizado na área produtiva.

3.4 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

Com o objetivo de analisar os resultados gerados pelas alterações das variáveis do sistema como massa total do tanque de aquecimento e a potência das resistências do sistema, foi realizado a análise de sensibilidade, obtendo-se o impacto teórico dessas mudanças no processo como um todo.

3.4.1 Variação Do Volume Do Tanque De Aquecimento

Para analisar o impacto da variação do volume do tanque de aquecimento, visando diminuir a influência da temperatura da água de retorno após trocar calor com o reator na unidade produtiva, considerou-se o dobro do volume do sistema atual. Dessa forma, para essa análise, considerou-se as variáveis massa do reator, potência das resistências e vazão da bomba centrífuga iguais às do sistema atual e a massa do tanque foi alterada para 30.000 kg.

3.4.2 Variação Da Potência Da Resistência Do Sistema De Aquecimento

Para analisar o impacto da variação da potência das resistências do sistema de aquecimento, visando aumentar a potência instantânea e, assim como no cenário anterior, diminuir a influência da temperatura da água de retorno após trocar calor com o reator na unidade produtiva, considerou-se o dobro da potência atual. Sendo assim, para a análise de sensibilidade da variável potência, considerou-se as variáveis massa do reator, massa do tanque e vazão das bombas iguais às do sistema atual e a potência foi alterada para 108 kW.

Alinhado aos conceitos de uso de aquecedores solares em processos industriais (SHIP) apresentados anteriormente, considerou-se o aumento da potência do sistema utilizando um sistema de coletores solares dimensionado para 108 kW, ao invés do aumento do número de resistência elétricas no sistema de aquecimento.

3.5 ANÁLISE ECONÔMICA

Para a análise econômica preliminar do sistema integrado com os coletores solares, calculou-se a energia elétrica necessária para aquecer a carga anual de produto produzido no reator na unidade produtiva. A carga térmica foi calculada a partir da equação fundamental da calorimetria que relaciona a quantidade de calor (Q) que um corpo de massa (m) e calor específico (c_p) absorve ou libera para variar sua temperatura em um certo valor (ΔT), representada na Equação 17. Adotou-se o mesmo calor específico para todos os produtos produzidos, sendo este semelhante

ao da água, de 1 kcal/°C/kg.

$$Q = m \cdot cp \cdot \Delta T \quad (17)$$

Através da carga térmica anual necessária foi possível calcular o custo anual de energia elétrica utilizando a tarifa média de fornecimento de energia fornecida pela Aneel para janeiro de 2021, no valor de R\$ 0,537/kWh.

Para o cálculo do período de retorno da implementação dos coletores solares (P_r), considerou-se esse como sendo a relação entre o custo de investimento no sistema de aquecimento (I) e o custo anual de energia elétrica (C_e), descrita na Equação 18. Como estimativa orçamentária para a implementação do sistema de aquecimento solar para a potência de 108 kW utilizou-se uma cotação disponibilizada pela Gerenpro Consultoria, sendo o valor total estimado para implementação de R\$ 225.850,00, estando esse valor detalhado no Anexo A.

$$P_r = \frac{I}{C_e} \quad (18)$$

3.6 ANÁLISE EXERGÉTICA

Por meio da análise energética é possível identificar as diferentes entradas e saídas de energia de um sistema. Sua performance é avaliada através da razão entre as saídas de energia útil e a soma de suas entradas de energia no sistema. Esse índice de desempenho é a eficiência da primeira lei e possui algumas limitações, como não considerar a degradação da qualidade da energia que ocorre na conversão de uma forma de energia para outra (KALOGIROU *et al.*, 2016).

Por isso, a análise exergética surge como uma importante ferramenta para ajudar a complementar a avaliação da performance de um sistema, provendo previsões sobre a sua capacidade de produzir trabalho mecânico. A eficiência exergética leva em consideração a segunda lei da termodinâmica e mede o desvio de um processo real para um ideal, reversível (KALOGIROU *et al.*, 2016).

A eficiência exergética para sistemas com coletores solares pode ser definida

como sendo a razão entre o aumento da taxa de exergia de um fluido, sendo esse a água no trabalho estudado, e a exergia da radiação solar, expressa pela Equação 19.

$$\eta_{ex} = \frac{\dot{E}x_{saída,f} - \dot{E}x_{entrada,f}}{\dot{E}x_{entrada,sol}} \quad (19)$$

Para o caso dos coletores solares de tubo evacuado estudado no presente trabalho, segundo KALOGIROU *et al.* (2016), pelo fato de se poder desconsiderar perdas convectivas nesse tipo de dispositivo, o numerador da eficiência exergética pode ser calculada pela Equação 20:

$$\dot{E}x_{saída,f} - \dot{E}x_{ent,f} = \dot{m}[(h_{saída} - h_{entrada}) - T_a(S_{saída} - S_{entrada})] \quad (20)$$

Onde \dot{m} representa a vazão mássica do sistema estudado (1 kg/s), $h_{saída}$ a entalpia da água saturada na temperatura de 75°C, $h_{entrada}$ a entalpia da água saturada na temperatura de 20°C, T_a a temperatura ambiente (20 °C), $S_{saída}$ a entropia da água saturada na temperatura de 75°C e, por fim, $S_{entrada}$ a entropia da água saturada na temperatura de 20°C. A exergia da radiação solar pode ser calculada pela expressão obtida empiricamente por Petela (2009), apresentada na Equação 21:

$$\dot{E}x_{entrada,sol} = \dot{Q}ab \left(1 - \frac{4T_a}{3T_s} + \frac{1}{3} \frac{T_a^4}{T_s^4} \right) \quad (21)$$

Em que $\dot{Q}ab$ representa a radiação solar absorvida pelo coletor e T_s a temperatura do sol, de 5770 K. Considerou-se para o estudo $\dot{Q}ab$ como sendo igual a potência para qual o sistema de coletores solares foi projetado, de 108 kW.

3.7 EQUAÇÃO NÃO-HOMOGÊNEA: MÉTODO DOS COEFICIENTES A DETERMINAR

A resolução e obtenção da solução geral da equação não-homogênea resultante da manipulação das equações do balanço de energia para os diferentes volumes de controle foi feita de forma analítica e utilizou-se o método dos coeficientes a determinar. Esse método pode ser usado de maneira a se obter a solução particular para uma equação linear não-homogênea (SODRÉ, 2003). Para definição, tratando-se de equações lineares de segunda ordem, se $d = d(x)$ é diferente de zero, a equação linear será dita não-homogênea.

De forma a facilitar o entendimento da resolução adotada, considere a Equação não-homogênea abaixo, representada pela Equação 22:

$$y'' + p(t)y' + q(t)y = g(t) \quad (22)$$

Em que p , q e g são equações contínuas em um intervalo aberto I . A Equação 18 representa a equação homogênea associada à Equação 23.

$$y'' + p(t)y' + q(t)y = 0 \quad (23)$$

Com base em teoremas, se Z_1 e Z_2 são soluções da equação não-homogênea (Equação 17), a diferença entre Z_1 e Z_2 será a solução para a equação homogênea associada (Equação 20). Essa solução será composta por um conjunto fundamental de soluções (y_1 e y_2) e constantes determinadas (c_1 e c_2), representada na Equação 24:

$$Z_1(t) - Z_2(t) = c_1y_1(t) + c_2y_2(t) \quad (24)$$

Dessa forma, a solução geral da equação não-homogênea $\varphi(t)$ pode ser escrita em função do conjunto fundamental de soluções para a equação homogênea associada, c_1 e c_2 , que são constantes arbitrárias, e $Y(t)$, que é a solução particular da equação não-homogênea, sendo essa solução representada na Equação 25:

$$\varphi(t) = c_1y_1(t) + c_2y_2(t) + Y(t) \quad (25)$$

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seguir será apresentado e discutido os resultados obtidos para os diferentes cenários estudados no presente trabalho, a análise econômica preliminar da instalação do sistema de coletores solares e, por fim, a análise exergética preliminar.

4.1 CENÁRIO 1: SISTEMA ATUAL

A Tabela 3 apresenta os valores das variáveis para o sistema atual, aplicadas nas Equações 8 e 12 resultantes dos balanços de energia.

Tabela 3 - Valores das variáveis do sistema de aquecimento para o cenário atual

Variável	Valor	Unidade
Massa do tanque (M)	15.000	kg
Massa do reator (m_r)	10.000	kg
Calor específico da água (c_p)	1	kcal/°C/kg
Potência das resistências (P)	54	kW
Potência das resistências (P)	46.507,2	kcal/h
Vazão da bomba (\dot{m})	3.600	kg/h

Fonte: elaborada pelo autor.

Resolvendo as equações resultantes do balanço diferencial de energia para o volume de controle 1 e volume de controle 2, como demonstrado no Apêndice A, utilizando-se do método dos coeficientes a determinar, tem-se as equações que descrevem o comportamento da temperatura dentro do tanque de água quente $T(t)$, Equação 26, e a temperatura dentro do tanque de processo, o reator, $\theta(t)$, Equação 27, em função do tempo, para as condições do cenário atual. Para a obtenção das constantes da solução geral da equação homogênea associada a equação

encontrada o balanço de energia utilizou-se as condições iniciais de processo, para $t=0$, adotando-se a temperatura no interior do reator como sendo de 20°C e no interior do tanque de aquecimento de 96°C .

$$T(t) = 24,35 e^{-0,6.t} + 1,87t + 344,65 \quad (26)$$

$$\theta(t) = -36,53 e^{-0,6.t} + 1,87t + 329,52 \quad (27)$$

Onde, em ambas as equações acima, as temperaturas estão em Kelvin (K) e o tempo em horas.

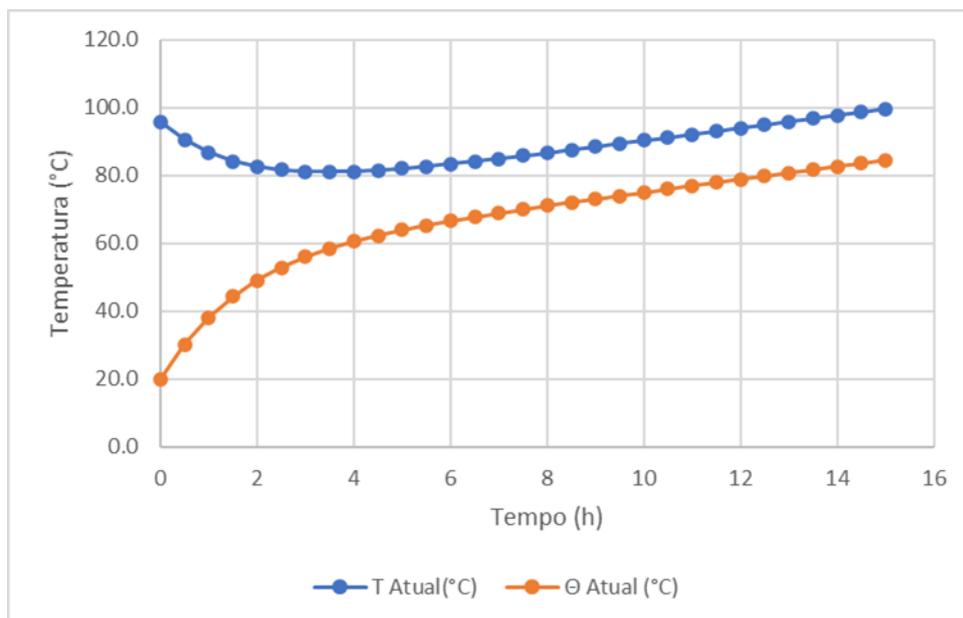
Aplicando uma variação de tempo entre 0 e 15 horas tem-se representado na Tabela 4 os valores de temperatura no interior do tanque de água quente ($T (^{\circ}\text{C})$) e tanque de processo ($\Theta (^{\circ}\text{C})$). Além disso, a representação gráfica dos valores da Tabela 4 para o cenário atual estão representados na Figura 6.

Tabela 4 – Valores da temperatura do Tanque de aquecimento (T) e líquido no interior do reator na área produtiva (Θ) ao longo do tempo para o cenário atual

Tempo (h)	T ($^{\circ}\text{C}$)	Θ ($^{\circ}\text{C}$)	Tempo (h)	T ($^{\circ}\text{C}$)	Θ ($^{\circ}\text{C}$)
0,0	95,9	19,8	8,0	86,7	71,0
0,5	90,5	30,2	8,5	87,5	72,0
1,0	86,7	38,2	9,0	88,4	73,0
1,5	84,2	44,3	9,5	89,3	74,0
2,0	82,6	49,1	10,0	90,3	75,0
2,5	81,6	52,9	10,5	91,2	75,9
3,0	81,1	55,9	11,0	92,1	76,9
3,5	81,0	58,4	11,5	93,0	77,8
4,0	81,2	60,5	12,0	94,0	78,8
4,5	81,6	62,3	12,5	94,9	79,7
5,0	82,1	63,9	13,0	95,8	80,7
5,5	82,7	65,3	13,5	96,8	81,6
6,0	83,4	66,6	14,0	97,7	82,5
6,5	84,1	67,8	14,5	98,6	83,5
7,0	85,0	68,9	15,0	99,6	84,4
7,5	85,8	70,0			

Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 6 – Perfis de temperatura ao longo do tempo para o cenário atual



Fonte: elaborado pelo autor

Dessa forma, para o cenário atual, o tempo necessário para o fluido no interior do reator na unidade produtiva atingir a temperatura de 75°C é de 10 horas.

4.2 CENÁRIO 2: ANÁLISE DE SENSIBILIDADE – DOBRAR O VOLUME DO TANQUE DE AQUECIMENTO.

A Tabela 5 apresenta os valores das variáveis para o cenário de análise de sensibilidade da variação do volume do tanque de aquecimento, que então foram aplicadas nas Equações 8 e 12 resultantes dos balanços de energia.

Resolvendo as equações resultantes do balanço diferencial de energia para os diferentes volumes de controle, como demonstrado no Apêndice B, também fazendo-se o uso do método dos coeficientes a determinar, tem-se as equações que descrevem o comportamento da temperatura dentro do tanque de água quente $T(t)$, Equação 28, e a temperatura dentro do tanque de processo $\theta(t)$, Equação 29, em função do tempo, para as condições do cenário em que se estuda dobrar o volume de água do tanque de aquecimento.

Tabela 5 – Valores das variáveis do processo para o cenário 2: Dobrar o volume do tanque de aquecimento.

Variável	Valor	Unidade
Massa do tanque (M)	30.000	kg
Massa do reator (m_r)	10.000	kg
Calor específico da água (c_p)	1	kcal/°C/kg
Potência das resistências (P)	54	kW
Potência das resistências (P)	46.507,2	kcal/h
Vazão da bomba (\dot{m})	3.600	kg/h

Fonte: Elaborado pelo autor

O processo utilizado para obtenção das constantes da solução geral da equação homogênea foi o mesmo descrito para o cenário atual, onde as condições iniciais do processo foram utilizadas, adotando-se a temperatura no interior do reator como sendo de 20°C e no interior do tanque de aquecimento de 96°C.

$$T(t) = 15,71 e^{-0,48.t} + 1,17 t + 353,29 \quad (28)$$

$$\theta = -47,13 e^{-0,48.t} + 1,17 t + 340,12 \quad (29)$$

Onde, em ambas as equações acima, as temperaturas estão em Kelvin (K) e o tempo em horas.

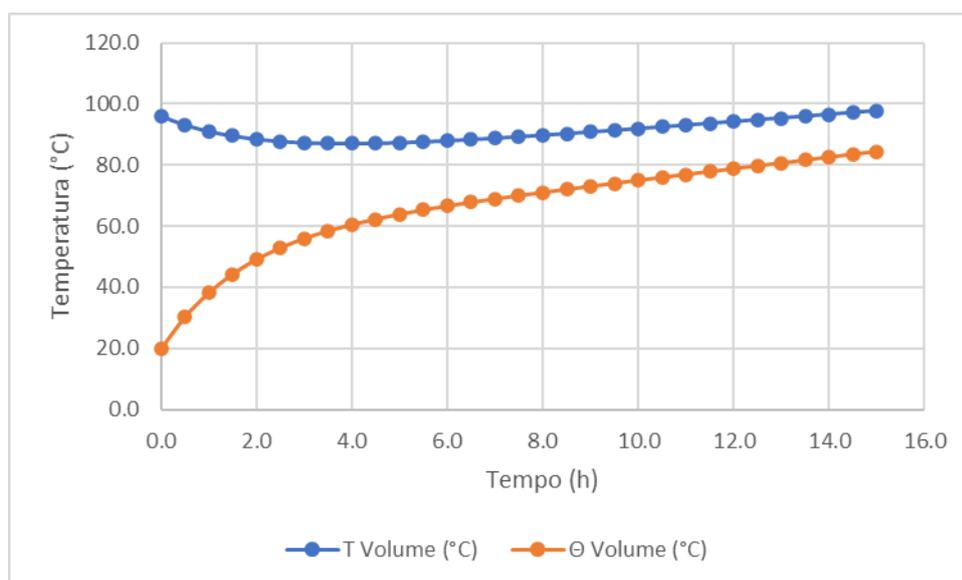
Aplicando uma variação de tempo entre 0 e 15 horas tem-se representado na Tabela 6 os valores de temperatura no interior do tanque de água quente e tanque de processo. Além disso, a representação gráfica dos valores da Tabela 6 para o cenário 2 estão representados na Figura 7.

Tabela 6 – Valores da temperatura do Tanque de aquecimento (T) e líquido no interior do reator na área produtiva (Θ) ao longo do tempo para o cenário 2

Tempo (h)	T (°C)	Θ (°C)	Tempo (h)	T (°C)	Θ (°C)
0,0	95,9	19,8	8,0	89,8	71,0
0,5	93,1	30,2	8,5	90,4	72,0
1,0	91,0	38,2	9,0	90,9	73,0
1,5	89,5	44,3	9,5	91,4	74,0
2,0	88,5	49,1	10,0	92,0	75,0
2,5	87,8	52,9	10,5	92,5	75,9
3,0	87,4	55,9	11,0	93,1	76,9
3,5	87,2	58,4	11,5	93,7	77,8
4,0	87,1	60,5	12,0	94,2	78,8
4,5	87,2	62,3	12,5	94,8	79,7
5,0	87,4	63,9	13,0	95,4	80,7
5,5	87,7	65,3	13,5	96,0	81,6
6,0	88,0	66,6	14,0	96,5	82,5
6,5	88,4	67,8	14,5	97,1	83,5
7,0	88,9	68,9	15,0	97,7	84,4
7,5	89,3	70,0			

Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 7 – Perfis de temperatura ao longo do tempo para o cenário 2



Fonte: Elaborado pelo autor

Sendo assim, com base nos resultados obtidos para o cenário com o dobro do volume de água no tanque de aquecimento, o tempo de necessário para atingir a

temperatura de 75°C no interior do reator de processo é de 10 horas, representando que não há diferença no tempo de aquecimento com o aumento do volume de água no tanque de aquecimento.

A definição da escolha de dobrar o volume atual do tanque de aquecimento para a análise do cenário 2 foi feita de forma arbitrária, apenas para avaliar a premissa de menor impacto da água de retorno em um valor maior de água aquecida. No entanto, essa análise mostra a importância de se fazer um estudo preliminar pois, caso a implementação desse cenário ocorresse sem essa avaliação, haveria um investimento em novo tanque de aquecimento de maior volume, pois o atual não teria a capacidade para a dobragem de sua massa, e não se teria benefícios diretos.

4.3 CENÁRIO 3: ANÁLISE DE SENSIBILIDADE – DOBRAR A POTÊNCIA DO SISTEMA DE AQUECIMENTO

A Tabela 7 apresenta os valores das variáveis para o cenário de análise de sensibilidade do aumento da potência do tanque de aquecimento.

Tabela 7 – Valores das variáveis do processo para o cenário 3: Dobrar a resistência do tanque de aquecimento.

Variável	Valor	Unidade
Massa do tanque (M)	15.000	kg
Massa do reator (m_r)	10.000	kg
Calor específico da água (c_p)	1	kcal/°C/kg
Potência das resistências (P)	108	kW
Potência das resistências (P)	93.014,4	kcal/h
Vazão da bomba (\dot{m})	3.600	kg/h

Fonte: elaborada pelo autor.

Resolvendo as equações resultantes do balanço diferencial de energia, como

demonstrado no Apêndice C, e utilizando-se do método dos coeficientes a determinar, tem-se as equações que descrevem o comportamento da temperatura dentro do tanque de água quente $T(t)$, Equação 30, e a temperatura dentro do tanque de processo $\theta(t)$, Equação 31, em função do tempo para as condições do cenário em que se estuda dobrar a potência das resistências do sistema de aquecimento.

$$T(t) = 24,68 e^{-0,6.t} + 5,17 t + 344,32 \quad (30)$$

$$\theta = -37,02 e^{-0,6.t} + 5,17t + 330,02 \quad (31)$$

Onde, em ambas as equações acima, as temperaturas estão em Kelvin (K) e o tempo em horas. Além disso, as constantes da solução geral da equação homogênea foram obtidas utilizando-se as condições iniciais do processo, para $t=0$, sendo a temperatura no interior do reator de 20°C e no interior do tanque de aquecimento de 96°C.

Aplicando uma variação de tempo entre 0 e 5,5 horas tem-se representado na Tabela 8 os valores de temperatura no interior do tanque de água quente e tanque de processo. Além disso, a representação gráfica dos valores da Tabela 8 para o cenário 3 estão representados na Figura 8.

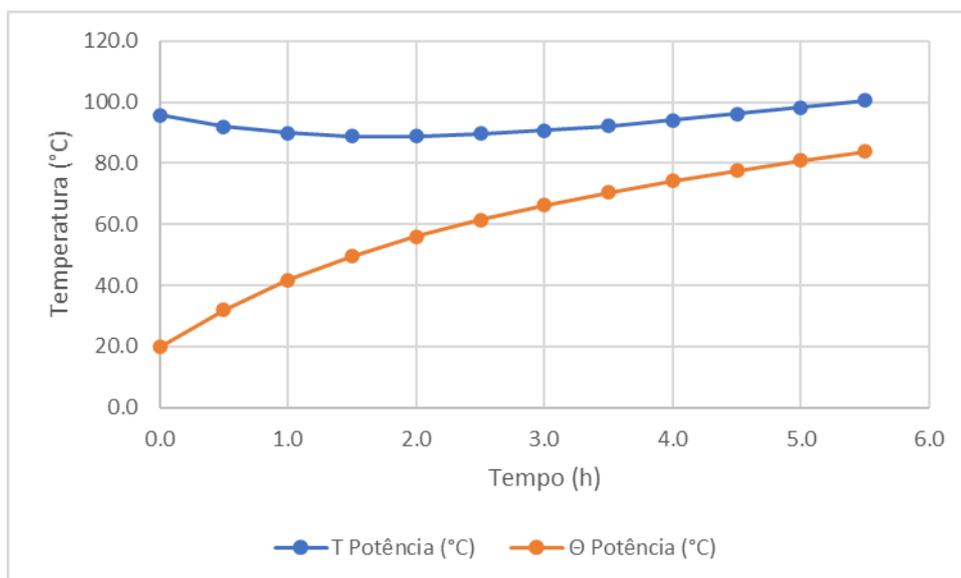
Tabela 8 – Valores da temperatura do Tanque de aquecimento (T) e líquido no interior do reator na área produtiva (Θ) ao longo do tempo para o cenário 3

Tempo (h)	T (°C)	Θ (°C)
0,0	95,9	19,8
0,5	92,0	32,0
1,0	89,9	41,7
1,5	89,0	49,6
2,0	88,9	56,1
2,5	89,6	61,5
3,0	90,8	66,3
3,5	92,3	70,4
4,0	94,1	74,2
4,5	96,1	77,6
5,0	98,2	80,9
5,5	100,5	83,9

Fonte: elaborada pelo Autor.

Fazendo a interpolação dos valores apresentados na Tabela 8, o tempo necessário para atingir a temperatura de 75°C no interior do reator de processo no cenário de duplicação da potência da resistência é de 4,12 horas.

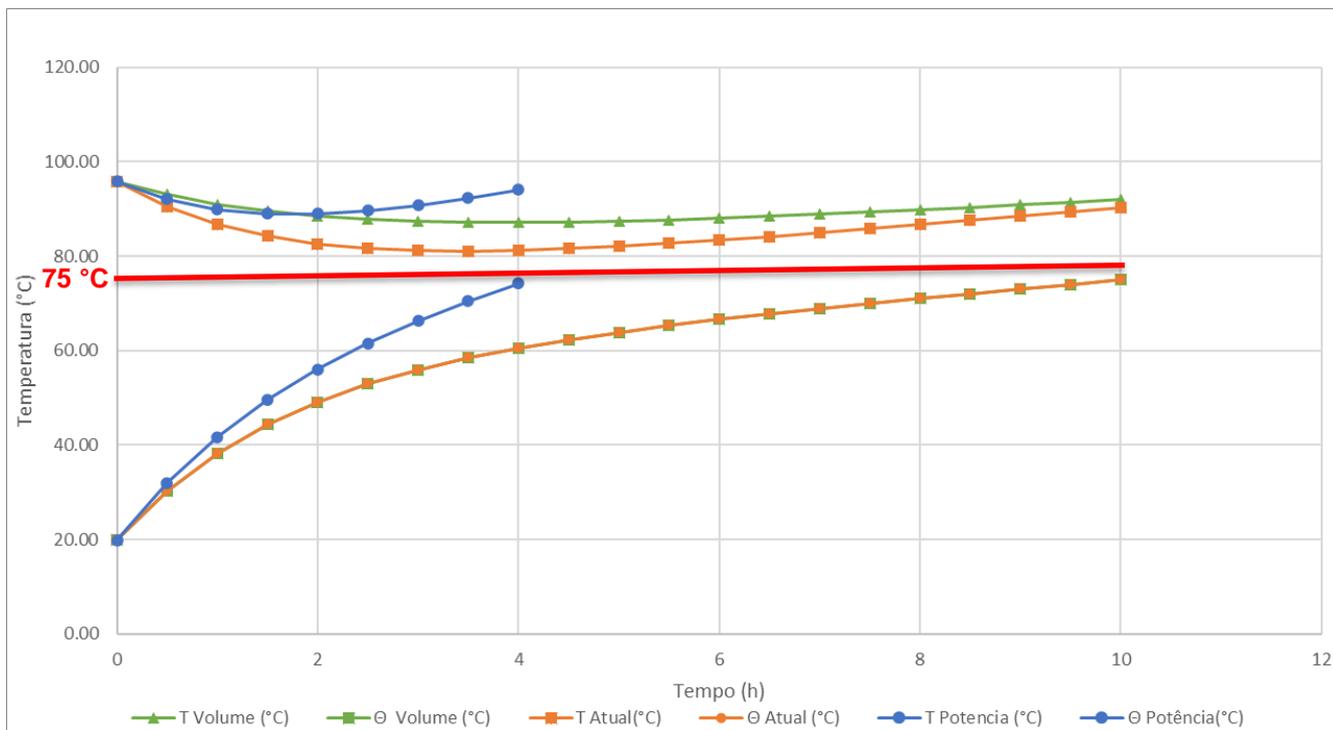
Figura 8 – Perfis de temperatura ao longo do tempo para o cenário 3



Fonte: elaborada pelo autor.

A Figura 9 apresenta o perfil de temperatura dos diferentes cenários agrupado, sendo a análise focada no tempo necessário para atingir 75°C no interior do reator para cada um deles, onde Θ Atual representa a curva de temperatura no interior do reator de produção para o cenário atual, Θ Volume para o cenário com o dobro do volume de água no tanque de aquecimento e Θ Potência para a alternativa com o dobro de potência no sistema de aquecimento.

Figura 9 – Perfis de temperatura agrupados para os diferentes cenários analisados



Fonte: elaborada pelo autor.

Observando a Figura 9 é possível concluir que ocorre uma troca rápida de calor entre a água aquecida e o fluido no interior do reator no início do processo, o que causa uma queda acentuada na temperatura da água do tanque de aquecimento (T). Essa queda na temperatura ocorre tanto para o cenário atual, onde a massa no interior do tanque de aquecimento é de 15.000 kg, quanto para o cenário em se analisou dobrar essa massa para 30.000 kg. Visualiza-se também que, embora esse fenômeno ocorra para ambos os cenários acima, ele é expressivo para o cenário do sistema atual. Esse impacto se torna menor com o passar do tempo, quando se tem uma menor diferença de temperatura entre os fluidos, sendo possível observar uma tendência de se atingir um valor constante para a temperatura da água no interior no tanque de aquecimento, enquanto a temperatura do fluido no interior do reator (Θ) continua a aumentar.

Ainda comparando o cenário de aquecimento atual com a duplicação da massa do tanque de aquecimento, é possível observar que as curvas de temperatura no interior do reator se sobrepõem, significando que não há uma diferença real entre o perfil dessa temperatura para esses cenários.

Quando se analisa o cenário de aumento da potência do sistema de aquecimento, de 54 kW para 108 kW, essa diminuição de temperatura do tanque de aquecimento no início do processo é baixa. A potência instantânea mais elevada compensa rapidamente a perda de temperatura e possibilita que o sistema opere no ponto de máxima eficiência de troca. No entanto, com o passar do tempo é possível observa-se que a temperatura no interior do tanque de aquecimento ficaria maior do que 100 °C, o que ocasionaria uma evaporação da água na pressão do sistema. Sendo assim, é importante ressaltar a relevância da aplicação de um sistema de controle de temperatura ligado aos coletores solares, com um setpoint menor do que 100°C, para garantir que a água não atinja sua temperatura de ebulição e não cause a cavitação das bombas do sistema.

Em relação ao tempo necessário para obtenção da temperatura de 75°C no interior do reator na unidade produtiva, parâmetro requerido pelo processo, tem-se que para o cenário de duplicação da potência do sistema de aquecimento é de 4,12 horas, enquanto que para o cenário atual e para o de dobrar o volume do tanque de aquecimento é de 10 horas. Dessa forma, observa-se uma redução de 60% do tempo de aquecimento para o cenário de duplicação da potência para 108 kW e não se tem ganhos com o aumento da massa do tanque de aquecimento para 30.000 kg.

Os tempos de aquecimento obtidos a partir das equações resultantes do balanço de energia para o cenário atual são condizentes com os valores observados experimentalmente na indústria estudada, indicando que as considerações feitas durante o desenvolvimento das equações são válidas. No entanto, sabe-se que algumas das considerações adotadas, como a não transferência de calor do sistema de aquecimento e das tubulações com a vizinhança por conta do isolamento com a lã de vidro de 80 mm, não condizem totalmente com a realidade, sendo indicado para uma análise futura a verificação dessa variável e a instalação de uma instrumentação no sistema para obter a temperatura de retorno da água ao sistema de aquecimento.

4.4 ANÁLISE ECONÔMICA PRELIMINAR

Como descrito anteriormente nos materiais e métodos, utilizando a equação fundamental da calorimetria, Equação 17, foi possível calcular a energia elétrica necessária para aquecer a carga anual de produto produzido na unidade produtiva

estudada. Considerando, então, os produtos A, B, C, D, E e F, a variação de temperatura de 55°C e os seus respectivos volumes anuais de produção, tem-se os valores de carga térmica anual apresentada na Tabela 9.

Tabela 9 – Cargas térmicas para aquecimento dos produtos produzidos na unidade produtiva estudada

Produto	Temperatura ambiente (°C)	Temperatura de processo (°C)	ΔT	Volume anual (ton)	Carga térmica anual (kcal)
Produto A	20	75	55	180	9.900.000
Produto B	20	75	55	64	3.520.000
Produto C	20	75	55	148	8.140.000
Produto D	20	75	55	368	20.240.000
Produto E	20	75	55	180	9.900.000
Produto F	20	75	55	8	440.000
				Total	52.140.000

Fonte: elaborada pelo autor

Convertendo a soma do valor obtido para a carga anual, tem-se, em Quilowatt-hora, 60.598,27 kWh/ano sendo gastos para o aquecimento dos produtos produzidos no reator da unidade produtiva em análise.

Considerando o custo de investimento no sistema de aquecimento da cotação disponibilizada pela Gerenpro Consultoria Empresarial para o sistema de aquecimento solar para a potência de 108 kW de R\$ 225.850,00 e assumindo que os custos operacionais e de manutenção são baixos, os mesmos foram desconsiderados do cálculo de retorno de investimento. Além disso, considerando a tarifa média de fornecimento de energia fornecida pela Aneel para janeiro de 2021, no valor de R\$ 0,537/kWh, foi possível obter o custo de energia anual para o aquecimento dos produtos multiplicando pela carga anual de 60.598,27 kWh/ano, sendo este valor de R\$ 32.541,27.

Utilizando a Equação 18 para o cálculo do período de retorno (P_r), tem-se:

$$P_r = \frac{I}{C_e} = \frac{R\$ 225.850}{R\$/ano 32.541,27} = 6 \text{ anos e } 9 \text{ meses} \quad (32)$$

Dessa forma, obteve-se a tempo de retorno de investimento de 6 anos e 9 meses para o projeto.

A análise econômica do projeto foi feita também do ponto de vista de lucro gerado. Considerando uma vida útil do sistema de 10 anos, o custo de implementação dividido por ano seria de R\$ 22.585, enquanto o ganho com a economia com os gastos anuais relacionados à energia elétrica seriam de R\$ 32.541, significando assim que a implementação do projeto de coletores solares geraria um lucro anual de R\$ 9.956.

4.5 ANÁLISE EXERGÉTICA PRELIMINAR

Para a análise exergética dos sistemas estudados utilizou-se as equações e os valores das variáveis do processo explicitadas anteriormente na seção de matérias e métodos. Sendo assim, utilizando-se a Equação 19, tem-se o cálculo da exergia da radiação solar:

$$\dot{E}x_{entrada,sol} = 108 \left[\frac{kJ}{s} \right] \left(1 - \frac{4}{3} \frac{293}{5770} \left[\frac{K}{K} \right] + \frac{1}{3} \frac{293^4}{5770^4} \left[\frac{K}{K} \right] \right) = 100.69 \frac{kJ}{s} \quad (32)$$

Utilizando os valores de entalpia e entropia da água saturada apresentado no Apêndice 1 para as temperaturas de entrada (20°C) e saída (75°C), foi possível calcular a eficiência exergética do sistema de coletores solares estudado ($\eta_{ex,col}$) utilizando as Equações 17 e 18 combinadas:

$$\eta_{ex,col} = \frac{1 \frac{kg}{s} \left((313,93 - 83,96) \left[\frac{kJ}{kg} \right] - 293 [K] \left(1,0155 - 0,2966 \left[\frac{kJ}{kg K} \right] \right) \right)}{100.69 \left[\frac{kJ}{s} \right]} \quad (33)$$

$$\eta_{ex,col} = \frac{19.33 \left[\frac{kJ}{s} \right]}{100.69 \left[\frac{kJ}{s} \right]} = 0,192 \quad (34)$$

Para a comparação com o sistema com resistências elétricas, calculou-se a eficiência exergética do sistema atual. Segundo Gong, Mei e Göran Wall (2016) o fator de exergia para energia elétrica é 1. Sendo assim, a eficiência exergética do sistema com resistências elétricas ($\eta_{ex,res}$) pode ser calculada pela equação 35:

$$\eta_{ex,res} = \frac{[\dot{m}[(h_{saída} - h_{entrada}) - T_a(S_{saída} - S_{entrada})]]}{\dot{Q}_{ab}} \quad (35)$$

$$\eta_{ex,res} = \frac{19.33 \left[\frac{kJ}{s} \right]}{108 \left[\frac{kJ}{s} \right]} = 0,179 \quad (36)$$

Quando comparado a eficiência exergética do sistema de coletores, 0,192, frente ao sistema atual com resistências elétricas, 0,179, tem-se uma maior eficiência para o sistema com coletores solares. Embora a diferença entre as mesmas seja pequena, isso significa que para a produção do mesmo efeito, aquecer a água até a temperatura de 75°C, está se destruindo menos energia de maior qualidade ao utilizar o sol como fonte direta para o aquecimento.

5 CONCLUSÃO

Pode-se concluir que o sistema de aquecimento de água industrial atual, composto por três resistências de 18 kW, apresenta um alto tempo para aquecer uma carga de 10000 kg até 75°C no reator na unidade produtiva da indústria de silicões de performance estudado, sendo esse tempo de 10 horas.

A modelagem térmica dos cenários estudados através do balanço diferencial de energia possibilitou obter valores de temperatura da água no interior do tanque de aquecimento e do fluido no interior do reator na unidade produtiva ao longo do tempo. Além disso, para o cenário atual, que possibilita a comparação, esses valores foram semelhantes aos observados experimentalmente, indicando boa aderência ao modelo utilizado e coerência nas considerações adotadas.

A sobreposição das curvas de temperatura no interior do reator na unidade produtiva para o cenário atual e o de dobrar a massa do tanque de aquecimento (de 15000 kg para 30000 kg) indica que não se tem uma diferença real entre os valores para esses dois cenários. Dessa forma, conclui-se que a premissa de que o impacto na temperatura no interior do tanque de aquecimento, em decorrência da água de retorno, seria menor para um volume maior de água, que ocasionaria uma diminuição no tempo de aquecimento, não é válida. Sendo assim, a análise de sensibilidade indica que dobrar o volume do tanque não traz benefício real para o tempo de aquecimento do fluido no reator, enquanto o aumento da potência para 108 kW tem resultado positivo e significativo, diminuindo o tempo necessário para atingir 75°C em 60%, sendo esse valor de 4,2 horas.

O uso de coletores solares como alternativa para aumentar a potência do sistema de aquecimento se mostrou positivo por diferentes motivos. Primeiro, por possibilitar a diminuição do uso de energia elétrica e endereçar questões relacionadas ao uso de energias renováveis. Segundo, pelos resultados encontrados em sua análise econômica preliminar, que indicam um tempo de retorno estimado para o projeto de 6 anos e 9 meses e um lucro anual com a sua implementação de R\$ 9.956. E, por fim, a eficiência exergética do sistema com coletores solares de 19,2% se mostrou maior que a do sistema com resistências elétricas (17,9%).

REFERÊNCIAS

BAZZO, E. **Geração de vapor. 2a edição.** Florianópolis, SC: Editora da UFSC, 1995. 216p.

ÇENGEL, Y.A.; GHAJAR, A.J. **Transferência de Calor e Massa – Uma abordagem prática.** 4ª ed. Porto Alegre: Mc Grall-hill, 2012.

BARMA, M.; SAIDUR, R; RAHMAN, S.; ALLOUHI, A.; AKASH, B; SADIQ, M. **A review on boilers energy use, energy savings, and emissions reductions.**

Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 9, p. 970-983, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.187>. Acesso em: 17 fev. 2021

BÓÇON, F. **PowerPoint de apoio à disciplina TMEC037, lecionada na UFPR.**

Disponível em:

http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TMEC037/Prof_Bocon/Tabelas_Vapor/Saturacao_temperatura.pdf. Acesso em: 05 jun. 2021.

CHOPRA, K. et al. **Global advancement on experimental and thermal analysis of evacuated tube collector with and without heat pipe systems and possible applications.** Applied Energy, Katra, v. 228, p. 351-389, jun 2018

COREL RESISTÊNCIAS ELÉTRICAS. **AQUECEDOR INDUSTRIAL.** Disponível em: <https://www.corel.ind.br/aquecedor-industrial>. Acesso em: 01 maio 2021.

CREDER, H. **Instalações hidráulicas e sanitárias.** Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora, 6ª Edição. 423p. il.. 2006.

FEITOSA, A. **Energias Renováveis: o Imenso Potencial Brasileiro.** São Paulo: Revista Exame, 2016. Disponível em:

<http://exame.abril.com.br/negocios/dino/energias-renovaveis-o-imenso-potencial-brasileiro-dino89081876131>. Acesso em: 01 maio 2021.

FELDER, R. M.; ROUSSEAU, R. W.; BULLARD, L. G. **Princípios elementares dos processos químicos.** Tradução de Luiz Eduardo Pizarro Borges. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2017.

GOLDEMBERG, J.; LUCON, O. **Energia e meio ambiente no Brasil.** Estud.

av., São Paulo, v. 21, n. 59, p. 7-20, 2007. Disponível em:

http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-40142007000100003&lng=en&nrm=iso. Acesso em: 17 fev. 2021.

GOLDEMBERG, José; LUCON, Oswaldo. **Energia, Meio Ambiente e Desenvolvimento.** 3. ed. São Paulo: Ed Usp, 2012.

HUANG, Junpeng et al. **Status and prospect of solar heat for industrial processes in China.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 90, p. 475-

489, 2018.

HORTA, Pedro; FHG, I. S. E. **Process Heat Collectors: State of the Art and available medium temperature collectors**. IEA SHC Task49/IV—Deliverable A, v. 1, 2015. Disponível em: <https://www.iea-shc.org/solar-heat-worldwide-2020>. Acesso em: 12 maio 2021.

IMC RESISTÊNCIAS. **Conheça os principais tipos de aquecedor industrial**. Disponível em: <https://imcresistencias.com.br/blog/aquecedor-industrial/>. Acesso em: 01 maio 2021.

JAFARKAZEMI, F.; AHMADIFARD, E.; ABDI, H. **Energy and exergy efficiency of heat pipe evacuated tube solar collectors**. Thermal Science, Teerã, v. 20, n. 1, p. 327-335, 2016.

JAMAR, AMZAA et al. **A review of water heating system for solar energy applications**. International Communications in Heat and Mass Transfer, v. 76, p. 178-187, 2016.

JUNGE, Sutherland D. **Cost-effective electric boilers: electric boilers a prudent alternative to gas boilers**. Heating/Piping/Air Conditioning Engineering, vol. 81, no. 1, Jan. 2009, p. BSE22+. Disponível em: link.gale.com/apps/doc/A192590926/AONE?u=capes&sid=AONE&xid=36846909. Acesso em: 22 maio de 2021.

KALOGIROU, S. A. **Solar Energy Engineering**. 2ª. ed. Oxford: Academic Press, 2014.

KALOGIROU, S. A., KARELLAS, S., BRAIMAKIS, K., STANCIU, C., BADESCU, V. **Exergy analysis of solar thermal collectors and processes**. Progress in Energy and Combustion Science, v. 56, p.106-137, 2016.

GONG, M.; WALL, G. **Exergy analysis of the supply of energy and material resources in the Swedish society**. Energies, v. 9, n. 9, p. 707, 2016.

LANGNISS, O.; INCE, D. **Solar water heating: a viable industry in developing countries**. Refocus, v. 5, n. 3, p. 18-21, 2004.

MEKHILEF, S.; SAIDUR, R.; SAFARI, A. **A review on solar energy use in industries**. Renewable and sustainable energy reviews, v. 15, p. 1777-1790, 2011.

PACHECO, F. **Energias Renováveis: breves conceitos**. Conjuntura e Planejamento, v. 149, p. 4-11, 2006.

PETELA, R. **Exergy of heat radiation**. ASME J Heat Transf, 1964.

SABIHA, M. A. et al. **Progress and latest developments of evacuated tube solar**

collectors. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Kuala Lumpur, 2014.

SIDDHARTH, Mohd; KHAN, Pathak. **Performance enhancement of solar collectors — A review**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 49, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.087>. Acesso em: 20 maio 2021.

SILVEIRA, L.; PETRINI, M. **Desenvolvimento Sustentável e Responsabilidade Social Corporativa: uma análise bibliométrica da produção científica internacional**. Gest. Prod., São Carlos, v. 25, p. 56-67, 2018. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0104-530X2018000100056&lng=pt&nrm=iso. Acesso em: 17 fev. 2021.

SHARMA, A.; PATHAK, A. K. **Evacuated Tube Solar Collectors Importance and Innovations in Wide Range Applications**, Jammu, v. 2, n. 4, p. 39-44, 2016.

SHUKLA, Ruchi et al. **Recent advances in the solar water heating systems: A review**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 19, p. 173-190, 2013.

SODRÉ, U. **Equações diferenciais ordinárias. Notas de aulas: computação, engenharia elétrica e engenharia civil**. São Carlos: UEL, 2003. Disponível em: <http://www.uel.br/projetos/matessencial/superior/pdfs/edo.pdf>. Acesso em: 16 fev. 2021.

WALLACE, W.D; SPIELVOGEL, L.G. **Field Performance of Steam and Hot Water Electric Boilers**. IEEE Transactions on Industry Applications, vol. IA-10, p. 761-769, 1974.

ZARPELON, W.; AZZOLINI, J. C. **Caldeiras de alta pressão: caracterização e avaliação da qualidade do tratamento das águas de abastecimento**. Unoesc & Ciência - ACET, v. 6, n. 2, p. 141–154, 2015. Disponível em: <https://portalperiodicos.unoesc.edu.br/acet/article/view/6554>. Acesso em: 22 maio 2021.

APÊNDICE A - Resolução do balanço de energia para o cenário 1

Para a resolução do balanço de energia para o cenário 1, que representa a análise do sistema atual, considerou-se os valores das variáveis apresentados na Tabela A1.

Tabela A1 - Valores das variáveis do sistema para o cenário atual

Variável	Valor	Unidade
Massa do tanque (M)	15.000	kg
Massa do reator (m_r)	10.000	kg
Calor específico da água (c_p)	1	kcal/°C/kg
Potência das resistências (P)	54	kW
Potência das resistências (P)	46.507,2	kcal/h
Vazão da bomba (\dot{m})	3.600	kg/h

Fonte: elaborada pelo autor.

Considerando as informações da Tabela A.1, que descreve os valores das variáveis do sistema em análise para o cenário atual, e aplicando-os na Equação A.1, temos que:

$$\frac{dT}{dt} = -\frac{3600}{15\,000} T + \frac{3600}{15\,000} (\theta + 10) + \frac{46507.2}{15\,000} \quad (\text{A.1})$$

$$\frac{dT}{dt} = -0.24 T + 0.24 \theta + 5.5 \quad (\text{A.2})$$

Com o objetivo de obter a Equação Diferencial que descreve o sistema estudado, derivando a Equação A.2 em relação ao tempo temos que:

$$\frac{d^2T}{dt^2} = -0.24 \frac{dT}{dt} + 0.24 \frac{d\theta}{dt} \quad (\text{A.3})$$

Além disso, isolando o termo relacionado a temperatura no interior do reator (θ) da Equação A.2, temos que:

$$\frac{1}{0.24} \frac{dT}{dt} = -T + \theta + \frac{5.5}{0.24} \quad (\text{A.4})$$

Rearranjando os termos:

$$\theta = 4.16 \frac{dT}{dt} + T - 22.92 \quad (\text{A.5})$$

Aplicando a Equação A.5 na Equação A.6, resultante do balanço de energia para o volume de controle 2:

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{\dot{m}}{m_r} T - \frac{\dot{m}}{m_r} (\theta + 10) \quad (\text{A.6})$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{\dot{m}}{m_r} T - \frac{\dot{m}}{m_r} \theta - 10 \frac{\dot{m}}{m_r} \quad (\text{A.7})$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{\dot{m}}{m_r} T - \frac{\dot{m}}{m_r} \left(4.16 \frac{dT}{dt} + T - 22.92 \right) - 10 \frac{\dot{m}}{m_r} \quad (\text{A.8})$$

Aplicando os valores listados na Tabela A.1 na Equação A.8 e organizando os termos:

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{3600}{10\,000} T - \frac{3600}{10\,000} \left(4.16 \frac{dT}{dt} + T - 22.92 \right) - 10 \frac{3600}{10\,000} \quad (\text{A.9})$$

$$\frac{d\theta}{dt} = 0.36 T - 0.36 \left(4.16 \frac{dT}{dt} + T - 22.92 \right) - 3.6 \quad (\text{A.10})$$

$$\frac{d\theta}{dt} = -1.5 \frac{dT}{dt} + 4.65 \quad (\text{A.11})$$

Combinando as equações A.11 e A.3:

$$\frac{d^2T}{dt^2} = -0.24 \frac{dT}{dt} + 0.24 \left(-1.5 \frac{dT}{dt} + 4.65 \right) \quad (\text{A.12})$$

$$\frac{d^2T}{dt^2} = -0.24 \frac{dT}{dt} - 0.36 \frac{dT}{dt} + 1.12 \quad (\text{A.13})$$

Dessa forma, como resultado do balanço energético do sistema estudado para os parâmetros atuais, tem-se a equação diferencial não homogênea de segunda ordem:

$$\frac{d^2T}{dt^2} + 0.6 \frac{dT}{dt} = 1.12 \quad (\text{A.14})$$

Para a resolução da equação diferencial será considerado o método dos coeficientes a determinar, onde é necessário se fazer a especificação da solução geral e particular da equação não-homogênea.

Para a resolução da solução geral, definiu-se uma equação homogênea associada a equação não-homogênea estudada:

$$K^2 + 0,6 K = 0 \quad (\text{A.15})$$

Para a resolução da solução particular, adotou-se a equação particular $T^* = t(A.t + B)$, onde A e B são constantes. Como continuação da solução equação particular, tem-se a sua derivada primeira e segunda:

$$\frac{dT^*}{dt} = 2A t + B \quad (\text{A.16})$$

$$\frac{d^2T^*}{dt^2} = 2A \quad (\text{A.17})$$

Substituindo as Equações A.16 e A.17 no Equação A.14, tem-se:

$$2A + 0,6 (2At + B) = 1,12 \quad (\text{A.18})$$

$$1,2 At + 2A + 0,6B = 1,12 \quad (\text{A.19})$$

Igualando os termos semelhantes:

$$1,2 A = 0 \rightarrow A = 0 \quad (\text{A.20})$$

$$0,6 B = 1,12 \rightarrow B = 1,87 \quad (\text{A.21})$$

Substituindo os valores na Equação Particular, tem-se:

$$T^* = t (A \cdot t + B) \quad (\text{A.22})$$

$$T^* = 1,87 t \quad (\text{A.23})$$

Para a resolução da solução geral da equação homogênea associada, considerando que ela possui raízes distintas (0 e -0,6), temos:

$$y = C1 e^{raiz1.t} + C2 e^{raiz2.t} \quad (\text{A.24})$$

$$y = C1 + C2 e^{-0,6.t} \quad (\text{A.25})$$

Onde C1 e C2 são constantes e e o número de Euler.

Sendo $T(t)$ a solução da equação diferencial não homogênea, resultado da combinação da solução da equação homogênea e a particular, temos:

$$T(t) = 1,87t + C1 + C2 e^{-0,6.t} \quad (\text{A.26})$$

Derivando a Equação A.26 em relação ao tempo (t):

$$\frac{dT}{dt} = 1,87 - 0,6 C2 e^{-0,6.t} \quad (\text{A.27})$$

Aplicando as Equações A.26 e A.27 na Equação A.2, tem-se:

$$1,87 - 0,6 C2 e^{-0,6.t} = -0,24 (1,87t + C1 + C2 e^{-0,6.t}) + 0,24 \theta + 5,5 \quad (\text{A.28})$$

Isolando θ :

$$\theta = -1,5 C2 e^{-0,6.t} + 1,87t + C1 - 15,13 \quad (\text{A.29})$$

Para a obtenção das constantes C1 e C2, considerando os valores dos parâmetros do processo nos instantes iniciais, temos que:

$$t = 0 \quad (\text{A.30})$$

$$\theta = 293 K \quad (\text{A.31})$$

$$T = 369 K \quad (\text{A.32})$$

Fazendo-se o uso da Equação A.26 desenvolvida anteriormente e aplicando os valores dos parâmetros apontados acima:

$$T(t) = 1,87t + C1 + C2 e^{-0,6.t} \quad (\text{A.33})$$

$$369 = 1,87.0 + C1 + C2 e^{-0,6.0} \quad (\text{A.34})$$

$$369 = C1 + C2 \quad (\text{A.35})$$

Seguindo o mesmo processo descrito anteriormente, utilizando a Equação A.29:

$$\theta = -1,5 C2 e^{-0,6.t} + 1,87t + C1 - 15,13 \quad (\text{A.36})$$

$$293 = -1,5 C2 e^{-0,6.0} + 1,87.0 + C1 - 15,13 \quad (\text{A.37})$$

$$308,13 = -1,5 C2 + C1 \quad (\text{A.38})$$

Resolvendo as Equações A.35 e A.38, temos:

$$C1 = 344,65 \quad (\text{A.39})$$

$$C2 = 24,35 \quad (\text{A.40})$$

Substituindo os valores encontrados nas equações A.26 e A.29, temos:

$$T(t) = 24,35 e^{-0,6.t} + 1,87t + 344,65 \quad (\text{A.41})$$

$$\theta(t) = -36,53 e^{-0,6.t} + 1,87t + 329,52 \quad (\text{A.42})$$

APÊNDICE B - Resolução do balanço de energia para o cenário 2

Para a análise do segundo cenário analisado no presente trabalho, o de dobrar o volume do tanque de aquecimento para 30000 kg, foram aplicados os valores presentes na Tabela B.1 nas equações resultantes do balanço de energia.

Tabela B.1 - Valores das variáveis do sistema para o cenário atual

Variável	Valor	Unidade
Massa do tanque (M)	30.000	kg
Massa do reator (m_r)	10.000	kg
Calor específico da água (c_p)	1	kcal/°C/kg
Potência das resistências (P)	54	kW
Potência das resistências (P)	46.507,2	kcal/h
Vazão da bomba (\dot{m})	3.600	kg/h

Fonte: elaborada pelo autor.

Considerando as informações da Tabela B.1, que descreve os valores das variáveis do sistema em análise para o cenário atual dobrando o volume de água no tanque de tanque, e aplicando-os na Equação B.1, temos que:

$$\frac{dT}{dt} = -\frac{\dot{m}}{M} T + \frac{\dot{m}}{M} (\theta + 10) + \frac{P}{M c_p} \quad (\text{B.1})$$

$$\frac{dT}{dt} = -\frac{3600}{30\,000} T + \frac{3600}{30\,000} (\theta + 10) + \frac{46507.2}{30\,000} \quad (\text{B.2})$$

$$\frac{dT}{dt} = -0.12 T + 0.12 \theta + 2.75 \quad (\text{B.3})$$

Com o objetivo de obter a Equação Diferencial que descreve o sistema

estudado, derivando a Equação B.3 em relação ao tempo temos que:

$$\frac{d^2T}{dt^2} = -0.12 \frac{dT}{dt} + 0.12 \frac{d\theta}{dt} \quad (\text{B.4})$$

Além disso, isolando o termo relacionado a temperatura no interior do reator (θ) da Equação B.3, temos que:

$$\theta = 8.33 \frac{dT}{dt} + T - 22.92 \quad (\text{B.5})$$

Aplicando a Equação B.5 na Equação resultante do balanço de energia para o volume de controle 2:

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{q}{m_r} T - \frac{q}{m_r} \left(4.16 \frac{dT}{dt} + T - 22.92 \right) - 10 \frac{q}{m_r} \quad (\text{B.7})$$

Aplicando os valores listados na Tabela X na Equação B.7 e organizando os termos:

$$\frac{d\theta}{dt} = -3.0 \frac{dT}{dt} + 4.65 \quad (\text{B.8})$$

Combinando as equações B.8 e B.4:

$$\frac{d^2T}{dt^2} = -0.12 \frac{dT}{dt} + 0.12 \left(-3 \frac{dT}{dt} + 4.65 \right) \quad (\text{B.9})$$

Dessa forma, como resultado do balanço energético do sistema estudado para os parâmetros atuais, tem-se a equação diferencial não homogênea de segunda ordem:

$$\frac{d^2T}{dt^2} + 0.48 \frac{dT}{dt} = 0.56 \quad (\text{B.10})$$

Para a resolução da equação diferencial será considerado o método dos coeficientes a determinar, onde é necessário se fazer a especificação da solução geral e particular da equação não-homogênea.

Para a resolução da solução geral, definiu-se uma equação homogênea associada a equação não-homogênea estudada:

$$K^2 + 0,48 K = 0 \quad (\text{B.11})$$

Para a resolução da solução particular, adotou-se a equação particular $T^* = t(A.t + B)$, onde A e B são constantes. Como continuação da solução equação particular, tem-se a sua derivada primeira e segunda:

$$\frac{dT^*}{dt} = 2A t + B \quad (\text{B.12})$$

$$\frac{d^2T^*}{dt^2} = 2A \quad (\text{B.13})$$

Substituindo as Equações B.12 e B.13 no Equação B.10, tem-se:

$$2A + 0,48 (2At + B) = 0,56 \quad (\text{B.14})$$

$$0,96At + 2A + 0,48 B = 0,56 \quad (\text{B.15})$$

Igualando os termos semelhantes:

$$0,96 A = 0 \rightarrow A = 0 \quad (\text{B.16})$$

$$0,48 B = 0,56 \rightarrow B = 1,17 \quad (\text{B.17})$$

Substituindo os valores na Equação Particular, tem-se:

$$T^* = t (A.t + B) \quad (\text{B.18})$$

$$T^* = 1,17 t \quad (\text{B.19})$$

Para a resolução da solução geral da equação homogênea associada,

considerando que ela possui raízes distintas (0 e -0,48), temos:

$$y = C1 e^{raiz1.t} + C2 e^{raiz2.t} \quad (B.20)$$

$$y = C1 + C2 e^{-0,48.t} \quad (B.21)$$

Onde C1 e C2 são constantes e e o número de Euler.

Sendo $T(t)$ a solução da equação diferencial não homogênea, resultado da combinação da solução da equação homogênea e a particular, temos:

$$T(t) = 1,87t + C1 + C2 e^{-0,48.t} \quad (B.22)$$

Derivando a Equação B.22 em relação ao tempo (t):

$$\frac{dT}{dt} = 1,17 - 0,48 C2 e^{-0,48.t} \quad (B.23)$$

Aplicando as Equações B.22 e B.23 na Equação B.3, tem-se:

$$1,17 - 0,48 C2 e^{-0,6.t} = -0,12 (1,17t + C1 + C2 e^{-0,48.t}) + 0,12 \theta + 2,75 \quad (B.24)$$

Isolando θ :

$$\theta = -3 C2 e^{-0,48.t} + 1,17t + C1 - 13,17 \quad (B.25)$$

Para a obtenção das constantes C1 e C2, considerando os valores dos parâmetros do processo nos instantes iniciais, temos que:

$$t = 0 \quad (B.26)$$

$$\theta = 293 K \quad (B.27)$$

$$T = 369 K \quad (B.28)$$

Fazendo-se o uso da Equação B.22 desenvolvida anteriormente e aplicando os valores dos parâmetros apontados acima:

$$T(t) = 1,17t + C1 + C2 e^{-0,48.t} \quad (\text{B.29})$$

$$369 = C1 + C2 \quad (\text{B.30})$$

Seguindo o mesmo processo descrito anteriormente, utilizando a Equação B.25:

$$293 = -3 C2 + C1 - 13,17 \quad (\text{B.31})$$

Resolvendo as Equações B.30 e B.31, temos:

$$C1 = 353,29 \quad (\text{B.32})$$

$$C2 = 15,71 \quad (\text{B.33})$$

Substituindo os valores encontrados nas equações B.22 e B.25, temos:

$$T(t) = 15,71 e^{-0,48.t} + 1,17 t + 353,29 \quad (\text{B.34})$$

$$\theta = -47,13 e^{-0,48.t} + 1,17t + 340,12 \quad (\text{B.35})$$

APÊNDICE C - Resolução do balanço de energia para o cenário 3

Para a análise do terceiro cenário analisado no presente trabalho, o de dobrar a potência do sistema de aquecimento para 108 kW, foram aplicados os valores presentes na Tabela C.1 nas equações resultantes do balanço de energia.

Tabela C.1 – Valores das variáveis para o cenário 3: Dobrar a resistência do tanque de aquecimento.

Variável	Valor	Unidade
Massa do tanque (M)	15.000	Kg
Massa do reator (m_r)	10.000	kg
Calor específico da água (c_p)	1	kcal/°C/kg
Potência das resistências (P)	108	kW
Vazão da bomba (\dot{m})	3.600	kg/h

Fonte: elaborado pelo autor

Considerando as informações da Tabela C.1, que descreve os valores das variáveis do sistema em análise para o cenário atual dobrando o volume de água no tanque de tanque, e aplicando-os na Equação C.1, temos que:

$$\frac{dT}{dt} = -\frac{\dot{m}}{M} T + \frac{\dot{m}}{M} (\theta + 10) + \frac{P}{M c_p} \quad (\text{C.1})$$

$$\frac{dT}{dt} = -\frac{3600}{15\,000} T + \frac{3600}{15\,000} (\theta + 10) + \frac{93014,4}{15\,000} \quad (\text{C.2})$$

$$\frac{dT}{dt} = -0,24 T + 0,24 \theta + 8,60 \quad (\text{C.3})$$

Com o objetivo de obter a Equação Diferencial que descreve o sistema estudado, derivando a Equação C.3 em relação ao tempo temos que:

$$\frac{d^2T}{dt^2} = -0.24 \frac{dT}{dt} + 0.24 \frac{d\theta}{dt} \quad (\text{C.4})$$

Além disso, isolando o termo relacionado a temperatura no interior do reator (θ) da Equação C.3, temos que:

$$\theta = 4,17 \frac{dT}{dt} + T - 35,83 \quad (\text{C.5})$$

Aplicando a Equação C.5 na equação resultante do balanço de energia para o volume de controle 2 e aplicando os valores da Tabela X:

$$\frac{d\theta}{dt} = -1.50 \frac{dT}{dt} + 12,90 \quad (\text{C.6})$$

Combinando as equações C.6 e C.4:

$$\frac{d^2T}{dt^2} = -0.24 \frac{dT}{dt} + 0.24 \left(-1,5 \frac{dT}{dt} + 12,90 \right) \quad (\text{C.7})$$

Dessa forma, como resultado do balanço energético do sistema estudado para os parâmetros atuais, tem-se a equação diferencial não homogênea de segunda ordem:

$$\frac{d^2T}{dt^2} + 0.6 \frac{dT}{dt} = 3.10 \quad (\text{C.8})$$

Para a resolução da equação diferencial será considerado o método dos coeficientes a determinar, onde é necessário se fazer a especificação da solução geral e particular da equação não-homogênea.

Para a resolução da solução geral, definiu-se uma equação homogênea associada a equação não-homogênea estudada:

$$K^2 + 0,6 K = 0 \quad (\text{C.8})$$

Para a resolução da solução particular, adotou-se a equação particular $T^* = t(A.t + B)$, onde A e B são constantes. Como continuação da solução equação particular, tem-se a sua derivada primeira e segunda:

$$\frac{dT^*}{dt} = 2A t + B \quad (\text{C.9})$$

$$\frac{d^2T^*}{dt^2} = 2A \quad (\text{C.10})$$

Substituindo as Equações C.9 e C.10 no Equação C.7, tem-se:

$$2A + 0,6(2At + B) = 3,10 \quad (\text{C.11})$$

$$1,2At + 2A + 0,6B = 3,10 \quad (\text{C.12})$$

Igualando os termos semelhantes:

$$1,2A = 0 \rightarrow A = 0 \quad (\text{C.13})$$

$$0,6B = 3,10 \rightarrow B = 5,17 \quad (\text{C.14})$$

Substituindo os valores na Equação Particular, tem-se:

$$T^* = t(A.t + B) \quad (\text{C.15})$$

$$T^* = 5,17 t \quad (\text{C.16})$$

Para a resolução da solução geral da equação homogênea associada, considerando que ela possui raízes distintas (0 e -0,6), temos:

$$y = C1 e^{raiz1.t} + C2 e^{raiz2.t} \quad (\text{C.17})$$

$$y = C1 + C2 e^{-0,6.t} \quad (\text{C.18})$$

Onde $C1$ e $C2$ são constantes e e o número de Euler.

Sendo $T(t)$ a solução da equação diferencial não homogênea, resultado da

combinação da solução da equação homogênea e a particular, temos:

$$T(t) = 5,17 t + C1 + C2 e^{-0,6.t} \quad (\text{C.19})$$

Derivando a Equação C.19 em relação ao tempo (t):

$$\frac{dT}{dt} = 5,17 - 0,6C2 e^{-0,6.t} \quad (\text{C.20})$$

Aplicando as Equações C.19 e C.20 na Equação C.3 e isolando θ , tem-se:

$$\theta = -1,5 C2 e^{-0,6.t} + 5,17t + C1 - 14,30 \quad (\text{C.21})$$

Para a obtenção das constantes C1 e C2, considerando os valores dos parâmetros do processo nos instantes iniciais, temos que:

$$t = 0 \quad (\text{C.22})$$

$$\theta = 293 \text{ K} \quad (\text{C.23})$$

$$T = 369 \text{ K} \quad (\text{C.24})$$

Fazendo-se o uso da Equação C.19 desenvolvida anteriormente e aplicando os valores dos parâmetros apontados acima:

$$T(t) = 5,17t + C1 + C2 e^{-0,6.t} \quad (\text{C.25})$$

$$369 = C1 + C2 \quad (\text{C.26})$$

Seguindo o mesmo processo descrito anteriormente, utilizando a Equação C.21:

$$293 = -1,5 C2 + C1 - 14,30 \quad (\text{C.27})$$

Resolvendo as Equações C.26 e C.27, temos:

$$C1 = 348,20 \quad (\text{C.28})$$

$$C2 = 20,80 \quad (C.29)$$

Substituindo os valores encontrados nas equações C.19 e C.21, temos:

$$T(t) = 24,68 e^{-0,6.t} + 5,17 t + 344,32 \quad (C.30)$$

$$\theta = -37,02 e^{-0,6.t} + 5,17t + 330,02 \quad (C.31)$$

ANEXO A – Estimativa para implementação do sistema de aquecimento solar

Item	Quantidade	Descrição	Valor Unitário	Total (R\$)
1	1	Banco de tubos a vácuo – 108 kW	81000	81000
2	2	Fotocélulas	450	900
3	2	Bomba	4000	8000
4	1	Quadro de comando	4000	4000
5	5	Sensor de nível	150	750
6	1	Tubulação e acessórios	20000	20000
7	10	Placas de identificação	50	500
8	1	Fiação, conduítes, suportes	1500	1500
9	2	Termômetro	350	700
10	900 kg	Suporte para placas	20	18000
11	1	Omissos	7000	7000
Subtotal de materiais				R\$ 142350,00
12		Instalação		22000
13		Fretes		3500
14		Estimativas de impostos		33000
15		Projeto executivo		25000
Total final estimado				R\$ 225850,00

Fonte: Gerenpro Consultoria Empresarial

ANEXO B – Propriedades da água saturada (líquido e vapor), entradas de temperatura

Temp. °C T	Sat. press. kPa P_{sat}	Specific volume m^3/kg		Internal energy kJ/kg			Enthalpy kJ/kg			Entropy kJ/(kg · K)		
		Sat. liquid v_f	Sat. vapor v_g	Sat. liquid u_f	Evap. u_{fg}	Sat. vapor u_g	Sat. liquid h_f	Evap. h_{fg}	Sat. vapor h_g	Sat. liquid s_f	Evap. s_{fg}	Sat. vapor s_g
0.01	0.6113	0.001 000	206.14	0.0	2375.3	2375.3	0.01	2501.3	2501.4	0.000	9.1562	9.1562
5	0.8721	0.001 000	147.12	20.97	2361.3	2382.3	20.98	2489.6	2510.6	0.0761	8.9496	9.0257
10	1.2276	0.001 000	106.38	42.00	2347.2	2389.2	42.01	2477.7	2519.8	0.1510	8.7498	8.9008
15	1.7051	0.001 001	77.93	62.99	2333.1	2396.1	62.99	2465.9	2528.9	0.2245	8.5569	8.7814
20	2.339	0.001 002	57.79	83.95	2319.0	2402.9	83.96	2454.1	2538.1	0.2966	8.3706	8.6672
25	3.169	0.001 003	43.36	104.88	2304.9	2409.8	104.89	2442.3	2547.2	0.3674	8.1905	8.5580
30	4.246	0.001 004	32.89	125.78	2290.8	2416.6	125.79	2430.5	2556.3	0.4369	8.0164	8.4533
35	5.628	0.001 006	25.22	146.67	2276.7	2423.4	146.68	2418.6	2565.3	0.5053	7.8478	8.3531
40	7.384	0.001 008	19.52	167.56	2262.6	2430.1	167.57	2406.7	2574.3	0.5725	7.6845	8.2570
45	9.593	0.001 010	15.26	188.44	2248.4	2436.8	188.45	2394.8	2583.2	0.6387	7.5261	8.1648
50	12.349	0.001 012	12.03	209.32	2234.2	2443.5	209.33	2382.7	2592.1	0.7038	7.3725	8.0763
55	15.758	0.001 015	9.568	230.21	2219.9	2450.1	230.23	2370.7	2600.9	0.7679	7.2234	7.9913
60	19.940	0.001 017	7.671	251.11	2205.5	2456.6	251.13	2358.5	2609.6	0.8312	7.0784	7.9096
65	25.03	0.001 020	6.197	272.02	2191.1	2463.1	272.06	2346.2	2618.3	0.8935	6.9375	7.8310
70	31.19	0.001 023	5.042	292.95	2176.6	2469.6	292.98	2333.8	2626.8	0.9549	6.8004	7.7553
75	38.58	0.001 026	4.131	313.90	2162.0	2475.9	313.93	2321.4	2635.3	1.0155	6.6669	7.6824
80	47.39	0.001 029	3.407	334.86	2147.4	2482.2	334.91	2308.8	2643.7	1.0753	6.5369	7.6122
85	57.83	0.001 033	2.828	355.84	2132.6	2488.4	355.90	2296.0	2651.9	1.1343	6.4102	7.5445
90	70.14	0.001 036	2.361	376.85	2117.7	2494.5	376.92	2283.2	2660.1	1.1925	6.2866	7.4791
95	84.55	0.001 040	1.982	397.88	2102.7	2500.6	397.96	2270.2	2668.1	1.2500	6.1659	7.4159

Fonte: Notas de Aula Fernando Bóçon