



**INSTITUTO LATINO-AMERICANO DE
TECNOLOGIA, INFRAESTRUTURA
E TERRITÓRIO**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
INTERDISCIPLINAR EM ENERGIA E
SUSTENTABILIDADE**

**REUSO DA ÁGUA, RECUPERAÇÃO DE CALOR RESIDUAL E COGERAÇÃO
COM TERMOGERADORES EM DESTILADORES PILSEN**

WAGNER FERREIRA

Foz do Iguaçu - PR
2024

**REUSO DA ÁGUA, RECUPERAÇÃO DE CALOR RESIDUAL E COGERAÇÃO COM
TERMOGERADORES EM DESTILADORES PILSEN**

WAGNER FERREIRA

Dissertação de Mestrado apresentado ao Programa de Pós-Graduação Interdisciplinar em Energia e Sustentabilidade do Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Energia e Sustentabilidade.

Orientadora: Prof. Dra. Andréia Cristina Furtado

Catálogo elaborado pelo Setor de Tratamento da Informação
Catálogo de Publicação na Fonte. UNILA - BIBLIOTECA LATINO-AMERICANA - PTI

F383r

Ferreira, Wagner.

Reuso da água, recuperação de calor residual e cogeração com termogeradores em destiladores Pilsen / Wagner Ferreira. - Foz do Iguaçu, 2024.

103 fls.: il.

Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território, Pós-Graduação Interdisciplinar em Energia e Sustentabilidade.

Orientador: Andreia Cristina Furtado.

1. Água - Reuso. 2. Calor residual. 3. Sustentabilidade. I. Furtado, Andreia Cristina. II. Título.

CDU 628.16

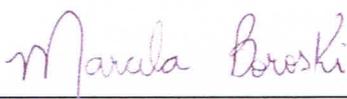
REUSO DA ÁGUA, RECUPERAÇÃO DE CALOR RESIDUAL E COGERAÇÃO COM TERMOGERADORES EM DESTILADORES PILSEN

Dissertação de Mestrado apresentado ao Programa de Pós-Graduação Interdisciplinar em Energia e Sustentabilidade do Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Energia e Sustentabilidade.

BANCA EXAMINADORA



Orientadora: Prof. Dra. Andréia Cristina Furtado
UNILA



Prof. Dra. Marcela Boroski
UNILA



Prof. Dr. Almiro Weiss
UTFPR-Md

Foz do Iguaçu, 21 de fevereiro de 2024.

Dedico este trabalho a minha avó Cecília Klós de Bastiani (in memoriam) que foi fundamental para a minha formação como profissional e como pessoa.

AGRADECIMENTOS

Certamente estes parágrafos não irão atender a todas as pessoas que fizeram parte dessa importante fase de minha vida. Portanto, desde já peço desculpas àquelas que não estão presentes entre essas palavras, mas elas podem estar certas que fazem parte do meu pensamento e de minha gratidão.

Agradeço a minha orientadora Prof.(a) Dr.(a) Andréia Cristina Furtado, pela sabedoria com que me guiou nesta trajetória.

Agradeço ao meu amigo Heberly Huiltton Amaral pelas contribuições e apoio ao desenvolvimento do meu projeto de mestrado.

Agradeço a minha namorada Aline Theodoro Toci pelo apoio nessa etapa da minha vida.

Aos meus colegas de trabalho no Departamento de Laboratórios de Ensino (DELABEN), em especial a Milene Miranda Almeida Lira pelas contribuições na área microbiológica.

Aos membros da banca examinadora de defesa que aceitaram avaliar e contribuir para a conclusão deste trabalho.

A Secretaria do Programa de Pós-Graduação Interdisciplinar em Energia e Sustentabilidade (PPGIES), pela cooperação.

A Secretaria de Apoio Científico e Tecnológico da UNILA na gestão das prezadas Solange Aikes e Fernanda Sotello.

Enfim, a todos os que por algum motivo contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho.

Cada pessoa deve trabalhar para o seu
aperfeiçoamento e, ao mesmo tempo,
participar da responsabilidade coletiva por
toda a humanidade.

Marie Curie

RESUMO

O homem, ao longo de sua história, sempre demandou uma elevada necessidade por fontes energéticas, o que o levou a uma era onde há a intensa exploração de recursos naturais, hídricos e o uso de combustíveis fósseis em larga escala. Atualmente com aproximadamente 80 % da demanda energética mundial sendo suprida por esses combustíveis, surgiu um intenso debate sobre a utilização dos mesmos e as restrições de sustentabilidade dos atuais padrões de uso destes a longo prazo. Esses questionamentos têm levado a busca por novas alternativas energéticas, mais eficientes e sustentáveis. Uma das alternativas que tem sido amplamente explorada é a recuperação de calor residual. Com uma estimativa de que se desperdiça entre 20% e 50% de energia térmica na indústria, desenvolveram-se métodos para recuperar e reutilizar a mesma. Um desses métodos é a cogeração de eletricidade com o uso de termogeradores (TEG), que quando são alimentados com calor utilizam o efeito Seebeck para gerar eletricidade. Os pontos mais relevantes no uso desse método é a geração de eletricidade sem a presença de peças mecânicas móveis, não produzirem subprodutos nocivos ao meio ambiente durante seu funcionamento, terem vida útil longa e funcionarem em uma faixa de temperatura ampla. O objetivo desse trabalho é o desenvolvimento e estudo de um sistema para reuso da água, recuperação da energia térmica residual e cogeração de eletricidade com TEG em destiladores de água tipo Pilsen. Foi construído um sistema para recircular a água no destilador Pilsen e recuperar a energia térmica residual presente na mesma. Determinou-se o ponto de vazão ideal do destilador, a qualidade da água que entra e circula no sistema e implementou-se os tratamentos necessários para que esta atenda aos requisitos estabelecidos pela portaria nº 888/21 do Ministério da Saúde (MS), que trata dos padrões de potabilidade da água. Foi analisado o potencial de cogeração de energia elétrica a partir da energia térmica residual presente no efluente, além de determinar as características do dispositivo de troca de calor entre a água e o módulo termoeletrico. Foram avaliadas as características do módulo termoeletrico, o comportamento do sistema bem como sua eficiência na recuperação e geração de energia elétrica. Também realizou-se um estudo dos aspectos de viabilidade econômica da aplicação do sistema. Os resultados demonstraram que a energia térmica residual recuperada ficou em uma taxa próxima ao da literatura consultada, ou seja, obteve-se uma taxa de recuperação de energia térmica residual de 60%. Quanto ao reuso dos recursos hídricos do sistema, verificou-se que é possível reutilizar 100% dos mesmos. Já o rendimento das pastilhas Seebeck ficaram em 6,5%, muito abaixo da faixa de rendimento de 11% a 14%, como esperada. Porém, mesmo com o baixo rendimento na conversão de energia térmica em energia elétrica, o estudo de viabilidade econômica demonstrou que a implantação do sistema proposto de reuso de água e cogeração de eletricidade é viável. Portanto, o sistema desenvolvido pode ser replicado, possibilitando que usuários do sistema de destilação de água tipo Pilsen economizem recursos hídricos e cogerelem eletricidade com a energia térmica residual presente no efluente.

Palavras-chave: Reuso de água; Calor residual; Recuperação de energia; Termogerador elétrico; Eficiência energética; Sustentabilidade.

RESUMEN

El hombre, a lo largo de su historia, siempre ha demandado una alta necesidad de fuentes de energía, lo que le ha llevado a una era donde existe una intensa explotación de los recursos naturales, hídricos y el uso de combustibles fósiles a gran escala. Actualmente, con aproximadamente el 80% de la demanda energética mundial siendo abastecida con estos combustibles, ha surgido un intenso debate sobre su uso y las restricciones de sostenibilidad de los patrones actuales de uso de estos combustibles en el largo plazo. Estas preguntas han llevado a la búsqueda de nuevas alternativas energéticas más eficientes y sostenibles. Una de las alternativas que se ha explorado ampliamente es la recuperación del calor residual. Con una estimación de que entre el 20% y el 50% de la energía térmica se desperdicia en la industria, se han desarrollado métodos para recuperarla y reutilizarla. Uno de estos métodos es la cogeneración de electricidad mediante termogeneradores (TEG), que cuando se les suministra calor utilizan el efecto Seebeck para generar electricidad. Los puntos más relevantes en el uso de este método son la generación de electricidad sin presencia de piezas mecánicas móviles, no producen subproductos nocivos para el medio ambiente durante su funcionamiento, tienen una larga vida útil y trabajan en un amplio rango de temperaturas. El objetivo de este trabajo es el desarrollo y estudio de un sistema de reutilización de agua, recuperación de energía térmica residual y cogeneración de electricidad con TEG en destiladores de agua tipo Pilsen. Se construyó un sistema para recircular el agua del destilador Pilsen y recuperar la energía térmica residual presente en el mismo. Se determinó el punto de flujo ideal del destilador, la calidad del agua que ingresa y circula en el sistema y se implementaron los tratamientos necesarios para que cumpla con los requisitos establecidos por la ordenanza n° 888/19 del Ministerio de Salud (MS). Se analizó el potencial de cogeneración de energía eléctrica a partir de la energía térmica residual presente en el efluente, además de determinar las características del dispositivo de intercambio de calor entre el agua y el módulo termoeléctrico. Se evaluaron las características del módulo termoeléctrico, el comportamiento del sistema así como su eficiencia en la recuperación y generación de energía eléctrica. También se llevó a cabo un estudio de los aspectos de viabilidad económica de la aplicación del sistema. Los resultados demostraron que la energía térmica residual recuperada fue a un ritmo cercano al de la literatura consultada, es decir, se obtuvo una tasa de recuperación de energía térmica residual del 60%. En cuanto a la reutilización de los recursos hídricos del sistema, se encontró que es posible reutilizar el 100% de los mismos. El rendimiento de las tabletas de Seebeck fue del 6,5 %, muy por debajo del rango de rendimiento del 11 % al 14 %, como se esperaba. Sin embargo, incluso con el bajo rendimiento en la conversión de energía térmica en energía eléctrica, el estudio de viabilidad económica demostró que la implementación del sistema propuesto de reutilización de agua y cogeneración de electricidad es viable. Por lo tanto, el sistema desarrollado puede replicarse, permitiendo a los usuarios del sistema de destilación de agua tipo Pilsen ahorrar recursos hídricos y cogenerar electricidad con la energía térmica residual presente en el efluente.

Palabras clave: Reutilización del agua; Calor residual; Recuperación de energía; Termogenerador eléctrico; Eficiencia energética; Sostenibilidad.

ABSTRACT

Man, throughout his history, has always demanded a high need for energy sources, which has led him to an era where there is intense exploitation of natural and water resources and the use of fossil fuels on a large scale. Currently, with approximately 80% of the world's energy demand being supplied by these fuels, an intense debate has arisen about their use and the sustainability restrictions of current patterns of use of these fuels in the long term. These questions have led to the search for new, more efficient and sustainable energy alternatives. One of the alternatives that has been widely explored is waste heat recovery. With an estimate that between 20% and 50% of thermal energy is wasted in industry, methods have been developed to recover and reuse it. One of these methods is the cogeneration of electricity using thermogenerators (TEG), which when supplied with heat use the Seebeck effect to generate electricity. The most relevant points in using this method are the generation of electricity without the presence of moving mechanical parts, they do not produce by-products harmful to the environment during operation, they have a long useful life and they work in a wide temperature range. The objective of this work is the development and study of a system for water reuse, recovery of residual thermal energy and cogeneration of electricity with TEG in Pilsen-type water distillers. A system was built to recirculate the water in the Pilsen distiller and recover the residual thermal energy present in it. The ideal flow point of the distiller was determined, the quality of the water that enters and circulates in the system and the necessary treatments were implemented so that it meets the requirements established by ordinance n° 888/19 of the Ministry of Health (MS). The potential for cogeneration of electrical energy from the residual thermal energy present in the effluent was analyzed, in addition to determining the characteristics of the heat exchange device between the water and the thermoelectric module. The characteristics of the thermoelectric module, the behavior of the system as well as its efficiency in recovering and generating electrical energy were evaluated. A study of the economic feasibility aspects of applying the system was also carried out. The results demonstrated that the residual thermal energy recovered was at a rate close to that of the literature consulted, that is, a residual thermal energy recovery rate of 60% was obtained. Regarding the reuse of the system's water resources, it was found that it is possible to reuse 100% of them. The yield of Seebeck tablets was 6.5%, well below the yield range of 11% to 14%, as expected. However, even with the low yield in converting thermal energy into electrical energy, the economic feasibility study demonstrated that the implementation of the proposed water reuse and electricity cogeneration system is viable. Therefore, the developed system can be replicated, enabling users of the Pilsen-type water distillation system to save water resources and co-generate electricity with the residual thermal energy present in the effluent.

Key words: Water reuse; Residual heat; Energy recovery; Electric thermogenerator; Energy efficiency; Sustainability.

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – ODSs relacionados a presente pesquisa	23
Quadro 2 – Finalidades básicas para o tratamento de água	24
Quadro 3 – Parâmetros de potabilidade da água	25
Quadro 4 – Procedimento para determinação da vazão ideal do destilador de água	27
Quadro 5 – Fontes x energia primária x energia secundária	33
Quadro 6 – Mecanismos de incrustação em trocadores de calor	42
Quadro 7 – Valores típicos do coeficiente de transferência de calor por convecção	44
Quadro 8 – Lista de materiais utilizados na construção do sistema	49
Quadro 9 – Lista de ferramentas utilizadas na construção do sistema	51
Quadro 10 – Análise da água da UNILA Campus Jardim Universitário	57
Quadro 11 – Informações técnicas do filtro cavalete para caixa d'água	58
Quadro 12 – Análises x problemas potenciais x pontos de coleta x periodicidade	59
Quadro 13 – Dados técnicos do destilador tipo Pilsen	61
Quadro 14 – Procedimento adaptado para determinação da vazão ideal do destilador	62
Quadro 15 – Características elétricas das células Seebeck	65
Quadro 16 – Configurações de montagem elétrica das pastilhas Seebeck	66
Quadro 17 – Componentes do diagrama hidráulico e suas respectivas funções	69
Quadro 18 – Componentes do diagrama elétrico e suas respectivas funções	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dados da determinação da vazão ideal	72
Tabela 2 – Características físico-químicas para controle da eficiência do filtro	73
Tabela 3 – Características físico-químicas e microbiológica da água do sistema de reuso	74
Tabela 4 – Resultados experimentais obtidos	76
Tabela 5 – Cogeração de eletricidade em vários gradientes de temperatura	77
Tabela 6 – Cogeração de eletricidade com pastilhas conectadas em série	78

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fontes de energia renováveis, tecnologias e aplicações	29
Figura 2 – Gráfico da matriz energética x gráfico da matriz elétrica mundial	31
Figura 3 – Matriz elétrica brasileira	31
Figura 4 – Esquema simplificado das perdas médias em instalações de vapor	34
Figura 5 – Demonstração simplificada do efeito Seebeck	35
Figura 6 – Dopagem semicondutor tipo N	37
Figura 7 – Dopagem semicondutor tipo P	37
Figura 8 – Esquema de um termogerador elétrico	38
Figura 9 – Rendimento do módulo em função de ZT para temperaturas diferentes	40
Figura 10 – Atividades de marcenaria	52
Figura 11 – Montagem hidráulica do sistema	53
Figura 12 – Montagem elétrica do sistema	54
Figura 13 – Montagem dos trocadores de calor e pastilhas Seebeck	54
Figura 14 – Sistema de desinfecção de água	56
Figura 15 – Alimentação de água no sistema de reuso de água	58
Figura 16 – Trocador de calor para pastilha Seebeck e água	63
Figura 17 – Confeção da estrutura de suporte dos trocadores de calor	63
Figura 18 – Desenho em perspectiva isométrica da bancada do sistema de reuso de água e cogeração	67
Figura 19 – Diagrama hidráulico do sistema de reuso de água	68
Figura 20 – Diagrama elétrico do sistema de reuso de água	70

LISTA DE ABREVIATURA

EPE	Empresa de Pesquisa Energética
GEE	Gases do Efeito Estufa
IEA	International Energy Agency
MP	Materiais Particulados
TEG	Thermoelectric Generator
ONU	Organização das Nações Unidas
ODS	Objetivos do Desenvolvimento Sustentável
TCE	Tribunal de Contas Europeu
TEMA	Standards of the Tubular Exchangers Manufacturers Association
SACT	Secretaria de Apoio Científico e Tecnológico
UNILA	Universidade Federal da Integração Latino-Americana
JU	Campus Jardim Universitário
MS	Ministério da Saúde
ANA	Agência Nacional de Águas
POP	Procedimento Operacional Padrão
SDT	Sólidos dissolvidos totais
FUNASA	Fundação Nacional de Saúde

LISTA DE SÍMBOLOS

mg	Unidade de medida miligrama
L	Unidade de medida litro
uT	Unidade de Turbidez
CH ₄	Metano
CO ₂	Dióxido de carbono
N ₂ O	Óxido nitroso
CO	Monóxido de carbono
SO _x	Óxidos de enxofre
NO _x	Óxidos de nitrogênio
Qu	Energia útil gerada no processo
ΣE ₁	Energia total que entra no processo
ΣP _t	Perdas de energia durante o processo
η	Rendimento
Bi ₂ Te ₃	Telureto de bismuto
α	Coefficiente de Seebeck
V/K	Unidade de medida Volts/Kelvin
ΔV	Tensão elétrica gerada pela diferença de temperatura
V	Unidade de medida Volts
T _f	Temperatura que o material está exposto no lado frio
T _q	Temperatura que o material está exposto no lado quente
K	Unidade de medida Kelvin
ZT	Figura de Mérito
P	Semicondutor tipo P
N	Semicondutor tipo N
PN	Junção de semicondutor tipo P e semicondutor tipo N
σ	Condutividade elétrica
k	Condutividade térmica
T	Temperatura absoluta
Quant.	Quantidade
und	unidade
NaClO	Hipoclorito de sódio
Ca(ClO) ₂	Hipoclorito de cálcio

Cl_2	Cloro gasoso
HOCl	Ácido hipocloroso
OCl^-	Íon hipoclorito
H_2O	Água
H^+	Íon hidrogênio
Cl^-	Íon cloro
CaCO_3	Carbonato de cálcio
Cr	Cromo

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	18
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	21
2.1 SUSTENTABILIDADE, RECURSOS HÍDRICOS E ENERGIA.....	21
2.1.1 Recursos Hídricos.....	23
2.1.1.1 <i>Tratamento de água</i>	24
2.1.1.2 <i>Determinação da vazão ideal em destiladores</i>	26
2.1.2 Energia.....	27
2.2 GERAÇÃO E COGERAÇÃO DE ENERGIA.....	32
2.3 EFEITO SEEBECK, SEMICONDUTORES E MÓDULOS TERMOELÉTRICOS.....	35
2.3.1 Semicondutores Tipo N e Tipo P.....	36
2.3.2 Módulos Termoeletrônicos.....	38
2.4 TROCADORES DE CALOR.....	40
2.4.1 Transferência de calor.....	42
2.4.2 Quantidade de calor.....	45
2.4.3 Energia consumida por um equipamento elétrico.....	46
3 OBJETIVOS.....	47
3.1 OBJETIVO GERAL.....	47
3.1.1 Objetivos Específicos.....	47
4 METODOLOGIA.....	48
4.1 DESENHOS E DIAGRAMAS.....	48
4.2 MATERIAIS.....	48
4.3 PROCESSO DE FABRICAÇÃO E MONTAGEM.....	51
4.4 ÁGUA.....	55
4.4.1 Captação e Tratamento.....	55
4.4.2 Análise da Água Realizada pelo Gestor do Abastecimento.....	56
4.4.3 Alimentação, Tratamento e Análise da Água no Sistema de Reuso de Água.....	57
4.5 RECUPERAÇÃO DE CALOR.....	60
4.5.1 Dados Técnicos do Destilador Tipo Pilsen.....	60
4.5.2 Determinação da vazão ideal.....	61
4.5.3 Recuperação do Calor Residual.....	62
4.6 COGERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA.....	64
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	67
5.1 PROJETO E FABRICAÇÃO DO SISTEMA DE REUSO DE ÁGUA.....	67
5.2 DETERMINAÇÃO DA VAZÃO IDEAL DO DESTILADOR PILSEN.....	72
5.3 EFICIÊNCIA DO FILTRO DE ÁGUA DO SISTEMA.....	73
5.4 QUALIDADE DA ÁGUA NOS RESERVATÓRIOS DO SISTEMA.....	74
5.5 RECUPERAÇÃO DO CALOR RESIDUAL DO EFLUENTE.....	75
5.6 COGERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA.....	77

5.7 VIABILIDADE ECONÔMICA DO SISTEMA.....	79
5.7.1 Viabilidade do Sistema de Reuso de Água.....	79
5.7.2 Viabilidade do Sistema de Cogeração de Eletricidade.....	80
5.7.3 Viabilidade do Sistema completo de Reuso de Água e Cogeração de Eletricidade.....	81
REFERÊNCIAS.....	84
APÊNDICE A – PROCEDIMENTO OPERACIONAL PADRÃO PARA COLETA DE AMOSTRA DE ÁGUA.....	90
ANEXO A – RELATÓRIO DE ANÁLISE DA ÁGUA DA UNILA CAMPUS JU.....	92
ANEXO B – PROTOCOLO DETERMINAÇÃO DA DUREZA DA ÁGUA.....	95
ANEXO C – PROTOCOLO DETERMINAÇÃO DE CLORO LIVRE NA ÁGUA.....	98
ANEXO D –PROTOCOLO DETERMINAÇÃO DE SÓLIDOS DISSOLVIDOS TOTAIS.....	100
ANEXO E – PROTOCOLO CONTAGEM DE BACTÉRIAS HETEROTRÓFICAS.....	101

1 INTRODUÇÃO

O homem vem demandando, ao longo de sua história, uma elevada necessidade por fontes energéticas, o que levou estas a estarem sempre em constante evolução. A fim de suprir suas primeiras necessidades, que basicamente eram o aquecimento de abrigos, cozimento de alimentos, iluminação noturna e proteção contra predadores, o ser humano se apropriou do uso do fogo. Com o domínio do fogo seguiu-se o desenvolvimento da agricultura e da pecuária, atividades estas que propiciaram que a energia excedente pudesse ser armazenada estocando-se alimentos e aumentando-se os rebanhos animais (FARIAS, SELLITTO, 2011).

Assim, pode-se potencializar o trabalho e se dedicar a múltiplas atividades, diversificando e otimizando as tarefas, aumentando desta forma o nível de conforto e sobrevivência da espécie humana. Porém, todos esses avanços sempre demandaram a busca por novas formas de energia e sua utilização, ou seja, muitas descobertas foram sendo realizadas e aprimoradas para suprir essas necessidades energéticas (FARIAS, SELLITTO, 2011).

Esse processo de desenvolvimento energético foi impulsionado pelo concomitante desenvolvimento de áreas como a matemática, a geometria e as engenharias em geral, ou seja, essas áreas proporcionaram o desenvolvimento de dispositivos mecânicos complexos que foram empregados com a finalidade de aproveitar a energia contida nos ventos e no vapor. Assim, na era do vapor se intensificou o uso do carvão mineral, empregando-se o mesmo na combustão a fim de produzir energia térmica, tornando-se dos combustíveis fósseis, o primeiro a ser utilizado em larga escala. Isso deu início a revolução industrial que levou ao surgimento de uma nova era, com desenvolvimento de máquinas como o automóvel e a necessidade de exploração e uso do petróleo em larga escala (FARIAS, SELLITTO, 2011).

Atualmente, de acordo com a *International Energy Agency* (IEA), aproximadamente 80 % da demanda mundial por energia primária é suprida por combustíveis fósseis, ou seja, carvão, petróleo, gás natural e seus derivados (IEA, 2022). Esses dados trazem à tona a dependência que a humanidade tem desses combustíveis e, alertam para o fato de que os mesmos se tornaram fundamentais para impulsionar as economias industrializadas, estando, na era atual, em praticamente todos os aspectos que envolvam atividades produtivas e a vida cotidiana (EPE, 2023).

Essa dependência dos combustíveis fósseis tornou-se foco e tem gerado muitos questionamentos, dentre eles, até quando essas reservas mundiais poderiam suprir as necessidades energéticas do homem. Somado a isso, também surgiram preocupações que dizem respeito às mudanças climáticas globais, ou seja, há um intenso debate sobre a utilização de combustíveis

fósseis e as restrições de sustentabilidade dos atuais padrões de uso dos mesmos a longo prazo. Nesse sentido, há uma estimativa de que até 2040 haverá um crescimento de 40% da demanda total de energia. Porém, apesar dos combustíveis fósseis serem a fonte predominante, a contribuição dos mesmos na produção total de energia por várias fontes diminuirá, ou seja, será necessário o desenvolvimento de novas fontes de energia ou o aprimoramento das fontes atuais para sanar esse problema (HASSAN et al., 2021).

Quanto aos impactos ambientais, há a necessidade do desenvolvimento de meios mais sustentáveis na produção e no uso das fontes energéticas, pois com a queima de combustíveis fósseis como fonte de energia, se emite bilhões de toneladas de gases de efeito estufa (GEE), anualmente na atmosfera. Isso acarreta significativamente na intensificação de problemas como o aquecimento global, mudanças climáticas e graves problemas de saúde aos seres humanos (LEITE et al., 2020).

Todos esses problemas têm motivado a busca por novas alternativas energéticas, mais eficientes e que melhorem os processos que utilizam as mesmas. Dentre muitas possibilidades de melhoria, um caso específico é a recuperação de calor residual, pois trata-se de um campo que tem sido amplamente explorado com o intuito de melhorar a eficiência no uso de energias. Há uma estimativa no setor industrial de que se desperdiça entre 20% e 50% da energia na forma de calor, ou seja, perde-se muita energia térmica por meio de gases quentes de exaustão, água utilizada em processos de resfriamento e perdas de calor em superfícies de equipamentos quentes e produtos aquecidos (RESTREPO et al., 2021).

Ao longo do tempo se desenvolveram muitas técnicas para se recuperar toda essa energia térmica residual, e reutilizá-la nos processos da própria planta industrial, através dos mais diversificados dispositivos. Esses dispositivos variam entre trocadores tubulares, bobinas circulares, trocadores de calor de placas, tubos de calor, rodas térmicas, termossifões, etc. A seleção do dispositivo mais adequado depende de critérios como taxa de transferência, fator de incrustação, custo e retorno do investimento e características específicas do equipamento que fornecerá calor residual e, basicamente recirculam o calor no processo (RESTREPO et al., 2021).

A cogeração de eletricidade é um método que se difere dos demais e vem se demonstrando promissor, pois a cogeração ocorre a partir da energia térmica residual que é transformada em energia elétrica (PERIS et al., 2015). Pode-se realizar a cogeração sem geradores eletromecânicos, ou seja, converte-se o calor residual de forma direta em eletricidade. Santos e Spinelli (2019) argumentam que isso é possível com o uso da tecnologia *Thermoelectric Generator* (TEG), que quando são alimentados com calor utilizam o efeito Seebeck para gerar eletricidade. Os pontos mais relevantes segundo os autores é justamente o fato de gerar-se energia elétrica sem a

presença de peças mecânicas móveis, não produzem subprodutos nocivos ao meio ambiente durante seu funcionamento, terem vida útil longa e funcionarem em uma faixa de temperatura ampla. Dos pontos destacados pelos autores, o funcionamento do dispositivo em uma ampla faixa de temperatura é o mais atrativo, pois o mesmo viabiliza que o dispositivo seja aplicado a nível industrial, com a cogeração podendo ser realizada com calor residual em baixa temperatura até altas temperaturas (SANTOS, SPINELLI, 2019).

Outro fator que favorece o uso e aprimoramento da tecnologia TEG é que a energia térmica é amplamente usada em vários segmentos industriais, como laticínio, frigorífico, madeireiro, têxtil, cerâmico, produção de cimento, siderúrgico, produção de açúcar, etc., ou seja, tem-se uma ampla gama de setores industriais onde pode-se utilizá-la. Assim, o calor residual, que teve um custo para ser produzido e que seria descartado no ambiente, passa a ser convertido em energia elétrica e a contribuir na diminuição da demanda por eletricidade na planta industrial em que ocorre a cogeração.

Assim, a técnica de recuperação de energia térmica residual e cogeração de eletricidade pode promover muitos benefícios, como a redução das emissões de gases do efeito estufa e gases nocivos à saúde humana, diminuição do consumo de combustíveis fósseis, aumento do consumo de energias mais limpas, otimização do uso de recursos hídricos, redução dos custos de produção e geração de eletricidade de forma mais sustentável.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A humanidade demanda cada vez mais energia, logo, buscam-se meios que aumentem a eficiência do uso da mesma. Portanto, há uma limitação cada vez maior para o desperdício e busca-se recuperar o máximo possível da energia não usada e recursos utilizados (SCUOTTO, 2013).

Assim, a cogeração de energia é uma alternativa que possui elevada eficiência energética, ou seja, propicia aos consumidores suprir suas necessidades simultâneas de calor e eletricidade sem elevar o custo de suas faturas. Além disso, outra grande vantagem com a cogeração de energia elétrica, é que se pode reduzir o consumo de energia primária de 15 a 30 % (PILON et al., 2012).

Além das vantagens já mencionadas, a cogeração propicia outros benefícios como a redução dos impactos ambientais causados na transformação de energia primária em secundária, ou seja, como a cogeração contribui na diminuição da utilização de combustíveis fósseis, conseqüentemente ocorre uma diminuição significativa nas emissões de GEE. Também, ao produzir-se calor e eletricidade no mesmo local onde se utiliza, a cogeração permite a redução dos custos de transmissão e distribuição da energia elétrica (PILON et al., 2012).

Assim, a fim de compreender os conceitos teóricos, impactos socioambientais e socioeconômicos relacionados com a recuperação e utilização de energia térmica residual para cogeração de energia elétrica, este capítulo abordará sobre sustentabilidade, recursos hídricos, energia, geração, cogeração, efeito Seebeck, semicondutores, termogeradores e transferências térmicas. Ou seja, a fim de se compreender a imensa rede que envolve a cogeração de energia elétrica e suas aplicações, se faz necessário entender as peculiaridades do processo, conhecer de forma abrangente as origens, vantagens e desvantagens, podendo assim, verificar se a mesma propicia malefícios ou benefícios em sua finalidade (NAGAOKA et al., 2007).

2.1 SUSTENTABILIDADE, RECURSOS HÍDRICOS E ENERGIA

Desde a Revolução Industrial em meados do século XVIII, as ações antrópicas passaram a ser mais frequentes e intensas, ou seja, o homem intensificou a exploração de recursos naturais, propiciando inúmeros prejuízos para a sociedade e o meio ambiente. Destacam-se, dentre os impactos negativos gerados, as mudanças climáticas, causadas principalmente pelas emissões de gases de efeito estufa (GEE) devido a queima de combustíveis fósseis. Logo, essa intensa exploração de recursos naturais e impactos ambientais têm sido um dos maiores desafios para a humanidade no último século, implicando perdas socioeconômicas e à saúde da população global

(LEITE et al., 2020).

Esse crescimento de impactos ambientais e problemas sociais, relacionados ao intenso consumo de energia, propiciou um aumento da abrangência dos debates sobre sustentabilidade nos últimos anos. Isso levou a busca por melhorias socioambientais, ou seja, tornou-se necessário o desenvolvimento de ferramentas que otimizem o uso de recursos a favor do meio ambiente. Desta forma, tornou-se essencial o desenvolvimento sustentável, com uma visão a longo prazo, que trata de forma equilibrada as questões econômicas, sociais e ambientais (TRES et al., 2021).

Cabe enfatizar que uma produção sustentável se caracteriza como a produção de bens por meio de processos e sistemas que são não poluentes. Sendo que esses processos produtivos devem priorizar a conservação energética e os recursos naturais sem deixar de ser economicamente viáveis. No entanto, eles devem ainda propiciar, tanto a curto e a longo prazo, resultados seguros e saudáveis tanto para os funcionários, quanto para as comunidades e consumidores. Devido a toda essa conjuntura, que envolve o consumo de recursos energéticos e as implicações ambientais envolvidas, tanto países desenvolvidos como os em desenvolvimento, têm-se deparado com o grande desafio de desenvolver meios de produção, distribuição, transformação e consumo de energia sem intensificar e, se possível minimizar, os efeitos negativos à sociedade e ao meio ambiente (CAMIOTO, REBELATTO, 2014).

Em 2009 na conferência sobre Mudanças Climáticas realizada em Copenhague, a comunidade científica internacional alertou, de forma incisiva, sobre o atual modelo econômico industrial e sua insustentabilidade. Foi enfatizado nesta conferência que a quantidade de gás carbônico emitida na atmosfera está no limite, pois a continuidade de suas emissões poderá levar a mudanças catastróficas no planeta. Ou seja, isso está diretamente ligado ao modelo energético mundial que é fortemente ancorado no uso de fontes energéticas finitas, principalmente os combustíveis fósseis (ANDRADE, MATTEI, 2013).

Com o alerta dado pela comunidade científica, governos e órgãos internacionais vem tomando algumas medidas. Dentre essas ações e medidas, destaca-se nos últimos anos, a iniciativa denominada Agenda 2030. Trata-se de uma proposição da Organização das Nações Unidas (ONU). Seu objetivo é promover um pacto mundial para um desenvolvimento sustentável, que garanta o desenvolvimento humano e o atendimento das necessidades básicas do cidadão, utilizando-se para isso um processo social, político e econômico que não desrespeite o ambiente e seja sustentável. Firmada em 2015, essa iniciativa conta com 193 países participantes e é composta por 17 Objetivos denominados Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS) (MOREIRA et al., 2019). No Quadro 1 pode-se observar dentre as 17 ODS, as quais a presente pesquisa está

fortemente ligada e o que justifica o alinhamento com as mesmas.

Quadro 1 – ODSs relacionados a presente pesquisa.

ODS	JUSTIFICATIVA DO ALINHAMENTO
3 Saúde e bem-estar	Reduzir substancialmente o número de mortes e doenças por produtos químicos perigosos, contaminação e poluição do ar e água do solo.
6 Água potável e saneamento	Aumentar substancialmente a eficiência do uso da água em todos os setores e assegurar retiradas sustentáveis e o abastecimento de água doce para enfrentar a escassez de água.
7 Energia limpa e acessível	Aumentar substancialmente a participação de energias renováveis na matriz energética global; Modernizar a tecnologia para o fornecimento de serviços de energia modernos e sustentáveis para todos nos países em desenvolvimento.
9 Indústria, inovação e infraestrutura	Modernizar a infraestrutura e reabilitar as indústrias para torná-las sustentáveis, com eficiência aumentada no uso de recursos e maior adoção de tecnologias e processos industriais limpos e ambientalmente corretos.
11 Cidades e comunidades sustentáveis	Reduzir o impacto ambiental negativo per capita das cidades, inclusive prestando especial atenção à qualidade do ar, gestão de resíduos municipais e outros.
12 Consumo e produção responsáveis	Alcançar a gestão sustentável e o uso eficiente dos recursos naturais; Alcançar o manejo ambientalmente saudável dos produtos químicos e todos os resíduos, ao longo de todo o ciclo de vida destes; Reduzir significativamente a liberação destes para o ar, água e solo, para minimizar seus impactos negativos sobre a saúde humana e o meio ambiente.
15 Vida terrestre	Assegurar a conservação, recuperação e uso sustentável de ecossistemas terrestres e de água doce.

Fonte: ONU, 2023.

O alinhamento com as ODS, visam o desenvolvimento de uma pesquisa que traga alternativas perante as limitações e os problemas decorrentes do uso de uma matriz energética mundial fortemente dependente de combustíveis fósseis. Buscam-se alternativas e soluções para problemas como a exaustão desses combustíveis fósseis e a degradação da saúde e condições ambientais, ou seja, procura-se a adoção de energias que respondam bem às inquietações e anseios por energias limpas e sustentáveis (GOLDEMBERG, 2015).

2.1.1 Recursos Hídricos

A água é um bem natural renovável, seu volume em nosso planeta é praticamente constante e, o consumo humano se faz basicamente com água doce. Porém, sua distribuição no planeta não é homogênea e, estima-se que de toda a água doce, aproximadamente, 70% estão em geleiras, 30% no subsolo e apenas 0,3% estão em mananciais superficiais. Além da distribuição natural que não é uniforme, as interferências humanas através dos impactos ambientais, como os desmatamentos, as emissões de gases poluentes e a superexploração de aquíferos subterrâneos, tem intensificado a sua escassez (AUGUSTO et al., 2012).

No Brasil, a princípio, pode-se considerar como uma situação privilegiada, pois aproximadamente 12% da água doce do mundo encontra-se em seu território, ou seja, é incontestável que em termos de quantidade o país seja considerado uma potência devido ao volume de água utilizável. Porém, trata-se de uma falsa sensação de disponibilidade desse recurso natural, pois a maior parte da água doce está localizada na Amazônia, ou seja, distante dos grandes complexos industriais, centros consumidores e onde se encontra a maior densidade demográfica. Dessa forma, mesmo possuindo a maior bacia hidrográfica do planeta, as grandes cidades brasileiras sofrem com a falta de água potável (BORBA, BAYER, 2015).

Além dessa conjuntura de distribuição da água e a escassez ocasionada pelas ações humanas, a água quando encontrada na natureza não se apresenta quimicamente pura. Isto ocorre devido a água possuir uma grande capacidade de transportar substâncias e assimilar substâncias solúveis. Normalmente, de acordo com o local de captação, verifica-se uma grande variação na composição química da água. Por exemplo, águas superficiais estão mais sujeitas à contaminação por minerais particulados e poluição por matérias orgânicas. Já águas subterrâneas estão mais propensas a apresentarem altos teores de sólidos dissolvidos. Todas essas variações físico-químicas acarretam problemas quando utilizadas em processos industriais e, requerem tratamento químico, a fim de melhorar a qualidade e viabilizar o uso industrial (ANA, 2009).

2.1.1.1 Tratamento de água

De acordo com Souza (2007) pode-se definir tratamento de água como “o conjunto de medidas necessárias para enquadrar a água nos padrões de potabilidade pré estabelecidos”[...], ou seja, são as medidas de tratamento que visam a princípio, atender a 3 finalidades básicas que podem ser observadas no Quadro 2 com maiores detalhes.

Quadro 2 – Finalidades básicas para o tratamento de água.

FINALIDADES	MOTIVO DO TRATAMENTO
HIGIÊNICAS	Remoção de bactérias, protozoários, vírus e outros microrganismos; Remoção de substâncias tóxicas; Redução do excesso de impurezas e de substâncias orgânicas.
ESTÉTICAS	Correção de cor, odor, sabor e turbidez.
ECONÔMICAS	Redução da cor, turbidez, dureza, corrosividade, da presença de ferro e manganês; Correção do odor, sabor e pH.

Fonte: Adaptado de Souza, 2007.

A água para uso em sistemas industriais é utilizada em processos de transformação da matéria-prima, resfriamentos, instalações hidro sanitárias e, geralmente requer

tratamento similar ao da água potável (SOUZA, 2007). Os tratamentos para uso em trocas de calor são a sedimentação de material grosseiro e a filtração. Normalmente a sedimentação é a primeira etapa, e remove as partículas suspensas mais densas da água através da ação da gravidade. Já a filtração é um processo de separação de sólidos em suspensão onde a água passa por um leito poroso (ANA, 2009).

No caso específico de destiladores tipo Pilsen, onde a finalidade da água é servir como matéria-prima e fluido de arrefecimento, deve-se realizar algumas análises físico-químicas (RONDON et al., 2017). Ou seja, a água que circula nesses modelos de destiladores deve atender aos padrões de potabilidade, estar em conformidade com os parâmetros físicos, químicos e microbiológicos estabelecidos na Portaria nº888, de 04 de maio de 2021, publicada pelo Ministério da Saúde (MS). No Quadro 3 estão listados os parâmetros a serem verificados, para esta pesquisa, referentes à qualidade da água e os seus respectivos valores máximos permitidos de acordo com a Portaria (BRASIL, 2021).

Quadro 3 – Parâmetros de potabilidade da água.

PARÂMETRO	VALOR MÁXIMO PERMITIDO
pH¹	6,0 a 9,5
Condutividade Elétrica	-
TDS²	1000 mg/L
Temperatura	-
Dureza Total	500 mg/L
Cor	incolor
Acidez	-
Turbidez	5 uT
Alcalinidade	-
Cloretos	250 mg/L

¹pH: potencial hidrogeniônico; ²total de sólidos dissolvidos.

Fonte: Brasil, 2021.

O método de tratamento utilizado a fim de adequar a água aos padrões de potabilidade, pode sofrer algumas alterações, pois as características da água captada influenciam sobre as técnicas de tratamento utilizadas. Por exemplo, águas provenientes de abastecimento público podem conter substâncias que necessitam ser removidas antes de se iniciar os tratamentos. Já águas de poços que contenham sais e substâncias orgânicas dissolvidas, precisam passar por tratamento adicional. Assim, para poderem atender a demandas específicas do processo em que serão utilizadas, as águas dependendo da origem de captação e necessidades de uso, não passarão

apenas por uma única etapa ou técnica de tratamento, ou seja, será necessária a combinação entre dois ou mais métodos de tratamento até que se consiga obter uma água com o nível de qualidade que atenda os padrões preestabelecidos (MARQUES, PEDRO, 2021).

2.1.1.2 Determinação da vazão ideal em destiladores

A destilação é um processo no qual, em uma das etapas, colocam-se em contato indireto fases líquida e vapor, cuja finalidade é a troca térmica entre ambos para que ocorra a condensação do vapor. Nesta fase do processo o consumo de energia e recursos hídricos são fatores de elevada relevância, ou seja, as melhorias ou o controle dos mesmos podem gerar grande economicidade de ambos os recursos (MARQUINI et al., 2007).

Assim, para esses sistemas onde ocorrem trocas de calor, é extremamente importante se implementar métodos ou técnicas que reduzam os volumes de água e energia consumidos nos mesmos (SOUZA, MANZELA, 2015). Portanto, segundo Rondon et al. (2017), um meio de otimizar o processo de destilação é realizando-se a verificação do ponto ótimo de funcionamento do destilador, ou seja, trata-se de verificar a vazão na qual obtêm-se o maior volume de condensado e o menor volume de efluentes.

Conforme Rondon et al. (2017), deve-se iniciar realizando-se a identificação dos dados técnicos e de funcionamento do equipamento disponibilizados pelo fabricante, ou seja, deve-se conhecer as informações contidas no manual do equipamento como a marca, o modelo, as características estruturais, químicas, elétricas, o consumo de água, volume produzido de produto e volume produzido de rejeito. Pois conhecendo-se essas informações, pode-se saber se o equipamento está funcionando adequadamente como fora projetado, ou seja, pode-se estimar o volume esperado de condensado e de efluentes.

Como no regime real de trabalho, o volume de condensado e efluentes depende da vazão de alimentação do equipamento. Conforme Rondon et al. (2017), deve-se realizar a verificação da vazão que propicia a otimização do processo. Para isso, segundo os autores, devem ser feitas 5 medições que verificam as variações de tempo e do volume de geração de efluente no sistema. Ou seja, eles descrevem que com o auxílio de um cronômetro e 3 provetas de 1 L, deve-se determinar o volume de água residual e o tempo necessário para produzir-se 0,5 L de água destilada. No Quadro 4 encontra-se o procedimento de determinação da vazão ideal segundo Rondon et al. (2017).

Quadro 4 – Procedimento para determinação da vazão ideal do destilador de água.

Passo	Procedimento
1	Definir 5 posições de abertura da válvula de alimentação de água do equipamento.
2	Colocar a proveta 1 na saída da água destilada a fim de captar a mesma.
3	Abrir a válvula de alimentação de água na 5ª posição de abertura.
4	Acionar o equipamento.
5	Acionar o cronômetro quando começar a sair água destilada.
6	Imediatamente, com a proveta 2, realizar a coleta da água residual.
7	Quando a proveta 2 estiver cheia deve-se substituí-la pela proveta 3.
8	Anotar o volume preenchido na proveta 2 e após descartar o mesmo.
9	Repetir os passos 7 e 8, intercalando o uso das provetas 2 e 3, até completar-se o volume de 0,5 L na proveta 1.
10	Ao completar 0,5 L na proveta 1 parar o cronômetro imediatamente e anotar o tempo registrado no mesmo.
11	Descartar o volume da proveta 1 e recolocá-la para coleta no momento que iniciar o próximo ciclo de medição.
12	Sem desligar o equipamento, passar a válvula para a próxima posição, esperar 15 minutos e repetir os procedimentos do 5 ao 11 para as outras 4 posições da válvula.
13	Aplicar os dados coletados na equação 1 para determinar as vazões de água destilada e residual.

Fonte: Adaptado de Rondon et al., 2017.

De acordo com Çengel e Cimbala (2015) a vazão volumétrica (Q_v) é o volume (V) deslocado por unidade de tempo (t), expressa pela equação (1).

$$Q_v = \frac{V}{t} \quad (1)$$

Assim, o cálculo do ponto ótimo de funcionamento do sistema, tem por objetivo determinar o menor tempo gasto para produzir um determinado volume de água destilada e o menor volume de água residual produzida, sem oferecer riscos ao equipamento e usuários (Rondon et al., 2017). Técnicas como esta podem propiciar otimizações no processo aumentando a eficiência dos mesmos. Ou seja, ocorre a implementação de menores volumes consumidos, mantendo-se a taxa de transferência de calor por unidade de volume ocupado, minimizando assim o uso de recursos hídricos e de energia (SOUZA, MANZELA, 2015).

2.1.2 Energia

Assim como a água a energia se tornou essencial à vida humana. Em sociedades primitivas seu custo era praticamente zero, pois obtinha-se energia através de lenha coletada em florestas e, sua finalidade basicamente era para aquecimento e atividades domésticas. Porém, aos

poucos o consumo de energia foi crescendo e tornou-se necessário a busca por outras fontes energéticas. Assim, na Idade Média passou-se a utilizar algumas alternativas como a energia dos ventos e de cursos da água. Mas devido ao crescimento das populações, as quantidades passaram a ser insuficientes para atender às necessidades das mesmas, principalmente nas cidades. Então em meados do século XVIII ocorreu a Revolução Industrial e foi preciso intensificar o uso do carvão, seguido do petróleo e do gás natural nos dias atuais (GOLDEMBERG, LUCON, 2007).

Logo, devido a fácil transportabilidade e a alta densidade energética, até o presente momento, não foram encontradas alternativas comparáveis a esses combustíveis fósseis. Isso torna o uso em larga escala desses combustíveis ideal nos transportes, na indústria e na agricultura (CARVALHO, 2014). Por esse motivo, atualmente 80% da matriz energética mundial é composta por combustíveis fósseis, ou seja, 4/5 da energia utilizada no mundo provém de fontes poluentes e não renováveis (IEA, 2022). Esses dados são corroborados pela Figura 2 e observando-se a mesma, pode-se ainda verificar que a fatia energia nuclear faz com que a proporção de fontes não renováveis suba para 85%, ou seja, menos de 15% da matriz energética mundial é composta por fontes renováveis (EPE, 2023). Portanto, com esse alto consumo de carvão, petróleo e gás natural que não são renováveis, o desenvolvimento subsequente à Revolução Industrial tem-se apoiado em bases fisicamente insustentáveis (CARVALHO, 2014).

Assim, além de ser uma fonte finita, o consumo desses combustíveis ocasiona desequilíbrios e poluição ambiental como chuvas ácidas e efeito estufa (GOLDEMBERG, 2000). Dentre os GEEs emitidos globalmente, os principais são o metano (CH_4), o dióxido de carbono (CO_2) e o óxido nitroso (N_2O). Dos 3 principais gases, destaca-se o CO_2 que representa cerca de 81% do total das emissões, se mantém por centenas de anos na atmosfera e sua emissão é proveniente principalmente da queima da gasolina, diesel, gás natural e carvão mineral (LEITE et al., 2020). Ou seja, parte da radiação infravermelha que seria devolvida pela terra ao espaço é absorvida pelos GEEs, provocando assim o aumento da temperatura atmosférica e as consequentes mudanças climáticas (BARROS, 2007).

A queima de combustíveis fósseis além de contribuir significativamente nas emissões de CO_2 e dos demais gases de efeito estufa, também contribui no aumento da concentração de materiais particulados (MP), hidrocarbonetos, monóxido de carbono (CO), óxidos de enxofre (SO_x), óxidos de nitrogênio (NO_x) e diversos outros poluentes atmosféricos, que são associados a problemas de saúde como as complicações cardiorrespiratórias. Assim, as grandes aglomerações urbanas sofrem de forma demasiada com a degradação da qualidade do ar, causado por essas mudanças climáticas e essas intensas emissões gasosas. Portanto, é de fundamental importância a promoção de estratégias e ações eficientes, voltadas à diminuição das emissões de

gases de efeito estufa e o controle da poluição atmosférica (LEITE et al., 2020).

Assim, atualmente os recursos naturais e renováveis passaram a ser o foco de inúmeras pesquisas, ou seja, percebeu-se que o aproveitamento das fontes renováveis de energia é uma excelente alternativa para substituir as energias poluentes e diminuir os impactos causados pelo uso das mesmas em larga escala. Ao serem utilizadas, as fontes renováveis de energia são capazes de se regenerar, ou seja, são inesgotáveis (NASCIMENTO, ALVES, 2016). Na Figura 1 pode-se observar, de acordo com o Tribunal de Contas Europeu (TCE, 2018), as principais fontes de energias renováveis, suas tecnologias correspondentes e as aplicações mais frequentes.

Figura 1 - Fontes de energia renováveis, tecnologias e aplicações.

<p>Energia solar</p>  <p>Fonte: Sol</p> <p>Tecnologias: Fotovoltaica, solar térmica</p> <p>Aplicações: Eletricidade, aquecimento e arrefecimento</p>	<p>Energia eólica</p>  <p>Fonte: Vento</p> <p>Tecnologias: Turbinas eólicas</p> <p>Aplicações: Eletricidade</p>	<p>Energia marinha</p>  <p>Fonte: Ondas, marés</p> <p>Tecnologias: Barragens maremotrizes</p> <p>Aplicações: Eletricidade</p>	<p>Energia hidráulica</p>  <p>Fonte: Água</p> <p>Tecnologias: Centrais hidroelétricas</p> <p>Aplicações: Eletricidade</p>	<p>Energia geotérmica</p>  <p>Fonte: Terra</p> <p>Tecnologias: Bombas geotérmicas e de calor</p> <p>Aplicações: Eletricidade, aquecimento e arrefecimento</p>	<p>Bioenergia</p>  <p>Fonte: Biomassa, resíduos</p> <p>Tecnologias: Combustão de biomassa, centrais de biogás, biocombustíveis</p> <p>Aplicações: Eletricidade, aquecimento e arrefecimento, transportes</p>
---	--	--	--	--	---

Fonte: TCE, 2018

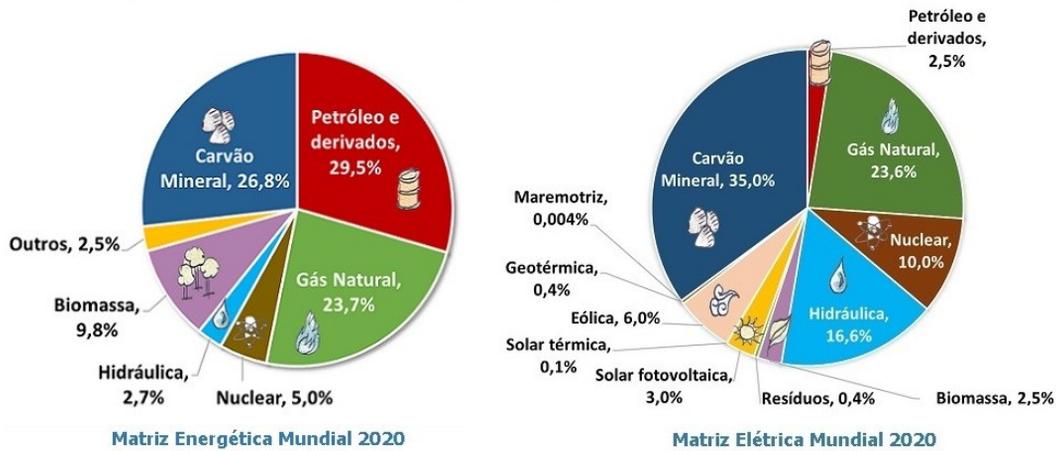
O desenvolvimento e a utilização dessas fontes de energia renováveis, suas tecnologias e aplicações podem trazer muitos benefícios socioeconômicos. Conforme Nascimento e Alves (2016), essas energias alternativas renováveis além de serem praticamente inesgotáveis, podem apresentar impactos ambientais muito baixo, sem afetar o balanço térmico ou a composição atmosférica da Terra. Os autores também argumentam que o desenvolvimento das tecnologias para o aproveitamento dessas fontes renováveis pode beneficiar regiões e comunidades rurais afastadas e, pode propiciar uma produção agrícola com maior autonomia energética, ou seja, além dos centros urbanos, também pode-se propiciar a melhoria da qualidade de vida em comunidades remotas (NASCIMENTO, ALVES, 2016).

Tomazini (2023) reforça que em regiões isoladas, o meio mais comum de

obtenção de energia é com óleo diesel, porém muitas dessas comunidades não dispõem de recursos financeiros para adquirir esse combustível necessário, pois devido ao alto esforço de transporte os mesmos podem chegar a preços inacessíveis. Também segundo o autor, a instalação de linhas de transmissão de energia elétrica que seriam uma alternativa, em muitas ocasiões, não pode ser realizada devido a dificuldades técnicas e/ou econômicas. Ou seja, o desenvolvimento e a disponibilização de tecnologias para o uso de energias renováveis, muitas vezes é a única opção para que comunidades em regiões isoladas possam desenvolver com menor esforço e maior qualidade as atividades agrícolas e domésticas.

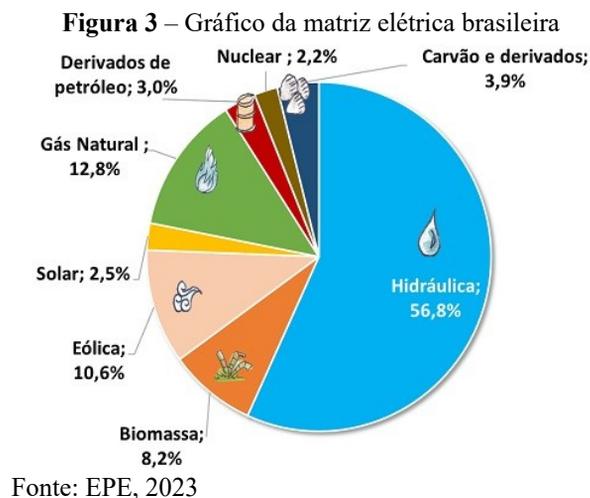
Outro benefício das energias renováveis é a geração de empregos diretos e indiretos, ou seja, promove-se uma série de crescimentos socioeconômicos, como a geração de mais atividades econômicas, desenvolvimento da indústria local, diminuição de desemprego, melhoria do progresso regional e diminuição da evasão campestre. Mais um benefício comunitário que merece destaque é a melhora da qualidade do ar, que está relacionada diretamente com a saúde humana e consequentemente reduz os gastos públicos no setor da saúde pública (TOMAZINI, 2023). Dupont et al. (2015) reforçam que os benefícios gerados pelo setor de energias renováveis têm despertado o interesse comum tanto da sociedade quanto da comunidade científica, impulsionando assim a pesquisa e o desenvolvimento de novas alternativas e estratégias para esse setor.

Na prática tem se verificado a tendência de uma maior contribuição das fontes renováveis na matriz energética mundial (DUPONT et al, 2015), mas a matriz elétrica mundial traz uma perspectiva ainda melhor quanto as fontes renováveis. De acordo com a IEA (2022), enquanto apenas 15% da matriz energética mundial é renovável, a matriz elétrica mundial chega a 29% proveniente de fontes renováveis, ou seja, apesar da geração de energia elétrica no mundo ainda ser baseada em combustíveis fósseis, a proporção de fontes renováveis praticamente dobra em relação a outra. Esses dados são corroborados pela Figura 2, que apresenta um comparativo entre o gráfico da matriz energética mundial e o gráfico da matriz elétrica mundial, demonstrando essa diferença significativa de uso de fontes renováveis entre ambas. Nesse comparativo, fica evidente que o uso de petróleo e seus derivados é reduzido drasticamente na geração de eletricidade e o uso da energia hidráulica é o que tem o aumento mais significativo dentre as fontes renováveis (EPE, 2023).

Figura 2 - Gráfico da matriz energética x gráfico da matriz elétrica mundial 2020

Fonte: EPE, 2023

Ainda melhor do que a matriz elétrica mundial é a matriz elétrica brasileira. O Brasil é líder mundial no uso de fontes renováveis como a solar, eólica, biomassa e hidráulica para geração de energia elétrica (BONDARIK et al., 2018). Enquanto apenas 16,6% da matriz elétrica mundial é de origem hidráulica a matriz elétrica brasileira, como se pode observar na Figura 3, tem 56,8% da sua geração baseada nesta fonte renovável. Somadas as outras fontes renováveis, chega-se a um percentual de aproximadamente 80%, ou seja, no Brasil conseguiu-se reduzir o uso de fontes não renováveis na geração de eletricidade para aproximadamente 20%.



Esse investimento massivo do Brasil na geração hidrelétrica é consequência da abundância de recursos hídricos disponíveis associado ao custo relativamente baixo de produção da mesma. São características que tornam a geração hidrelétrica, entre os recursos energéticos disponíveis, uma opção altamente interessante. Além disso, comparada com a geração termoelétrica, a geração hidrelétrica apresenta impactos ambientais inferiores (DUPONT et al., 2015). Porém, apesar das muitas vantagens a hidro geração tem alguns problemas, dentre os quais

um de elevada relevância é quando não ocorre as entradas de água. Ou seja, secas e estiagens ocasionadas pelas mudanças climáticas, afetam diretamente a produção de eletricidade devido aos reservatórios de água diminuírem seus níveis. Assim, apesar da produção de energia hidrelétrica ser predominante no Brasil, se deve cada vez mais complementar a geração elétrica com outras fontes renováveis e sustentáveis. Pois assim, além de suprir o crescente aumento da demanda por energia elétrica, pode-se diminuir os impactos ocasionados nos reservatórios em períodos de seca (BONDARIK et al., 2018).

Uma opção sustentável para aumentar a produção de energia elétrica no Brasil, suprimindo a crescente demanda e minimizando os impactos das secas nos reservatórios, é a cogeração de energia elétrica. De acordo com Nagaoka et al. (2007), a cogeração é um sistema que visa a diminuição do uso de fontes de energias primárias em relação a plantas tradicionais, pois opera-se com maior eficiência, devido à produção simultânea de calor e eletricidade. Ou seja, a cogeração é um processo em que a produção de energia elétrica ocorre de forma combinada com a energia térmica, destinando-se ambas ao consumo próprio ou de terceiros (PILON et al., 2012).

2.2 GERAÇÃO E COGERAÇÃO DE ENERGIA

Conforme Halliday et al. (2016a) “a energia pode mudar de forma e ser transferida de um objeto para o outro, mas a quantidade total de energia permanece constante [...]”, ou seja, energia não pode ser criada, ela somente pode ser transformada. Assim, de acordo com a Lei de Conservação de Energia apresentada pelos autores, toda a energia é proveniente de uma fonte primária e pode ser transformada em uma forma de energia secundária para ser utilizada.

De acordo com Júnior et al. (2014), as fontes de energia primária são as formas energéticas disponíveis na natureza, como energia solar, combustíveis fósseis, hidráulica, eólica, urânio, resíduos vegetais etc. Já a energia secundária segundo os autores, compreende os resultados dos diferentes processos de transformação, ou seja, é a energia primária transformada em outra forma de energia. Ou seja, transformar uma fonte primária em secundária é o processo de geração, por exemplo, como ocorre nas caldeiras onde a biomassa é transformada em calor, ou nas refinarias onde o petróleo é transformado em combustíveis.

Assim, a energia elétrica entregue aos consumidores finais por meio das extensas redes de distribuição é uma forma de energia secundária, ou seja, trata-se de uma energia obtida a partir de diferentes fontes de energias primárias, como a hidráulica, eólica, solar, nuclear, fóssil etc. Logo, a escolha de uma ou mais dessas fontes primárias para gerar a eletricidade, vai depender em cada país de diversos fatores, como a disponibilidade de recursos, interesses comerciais, domínio de

tecnologias e a preservação do meio ambiente (FARIAS, SELITTO, 2011).

No Quadro 5 apresentam-se as principais fontes de energia não renováveis e renováveis, como estas se encontram na forma primária e em quais energias secundárias são mais comumente transformadas. Observando-se especificamente a coluna de energia secundária no Quadro 5, verifica-se que os processos de geração em sua maioria convertem a energia primária em eletricidade e calor. Simabukulo et al. (2006) argumenta que a transformação da energia que está disponível na natureza está diretamente relacionada com as formas de energia que necessitamos para realizar trabalho, ou seja, a coluna de energia secundária do quadro 5 apresenta as formas de energia geradas que a humanidade mais necessita para desenvolver suas atividades, sejam elas triviais ou complexas.

Quadro 5 – Fontes x energia primária x energia secundária.

Fontes		Energia primária	Energia secundária
Não-renováveis	Fósseis	Carvão mineral	Termoeletricidade, calor combustível para transporte
		Petróleo e derivados	
		Gás natural	
	Nuclear	Materiais físséis	Termoeletricidade, calor
Renováveis	“Tradicionais”	Biomassa primitiva; Lenha de desmatamento	Calor
	“Convencionais”	Potenciais hidráulicos de médio e grande porte	Hidreletricidade
		Potenciais hidráulicos de pequeno porte	
	“Promissoras”	Biomassa “moderna”; lenha replantada, culturas energéticas (cana-de-açúcar, óleos vegetais)	Biocombustíveis (etanol, biodiesel, termoeletricidade, calor)
		Energia solar	Calor, eletricidade, fotovoltaica
		Geotermal	Calor e eletricidade
		Eólica	Eletricidade
		Maremotriz e das ondas	

Fonte: Adaptado de GOLDEMBERG, LUCON, 2007

Apesar de na natureza a energia se conservar, quando tentamos transformá-la a fim de aplicá-la às nossas necessidades, alguns problemas podem surgir. Por exemplo, quando se transforma energia térmica em trabalho, não se consegue uma eficiência de 100%, ou seja, parte da energia térmica é perdida no processo e somente uma parcela é convertida em trabalho. Em centros de transformação, como por exemplo, termoelétricas, hidrelétricas, refinarias etc, onde ocorre a

conversão de um tipo de energia em outro, a eficiência do processo pode ser definida através de uma equação geral entre a energia útil gerada (Q_u) com a energia total que entra no processo (ΣE_1) menos as perdas de energia durante o mesmo (ΣP_t), e é representada pela equação 2 (SIMABUKULO et al., 2006).

$$Q_u = \Sigma E_1 - \Sigma P_t \quad (2)$$

Segundo Sola e Mota (2015), outra forma de expressar a energia útil em sistemas de conversão de energia, é através do rendimento (η). Pode-se expressar o rendimento através do quociente entre a energia útil gerada e a energia total que entra no processo, e a equação 3 representa a mesma.

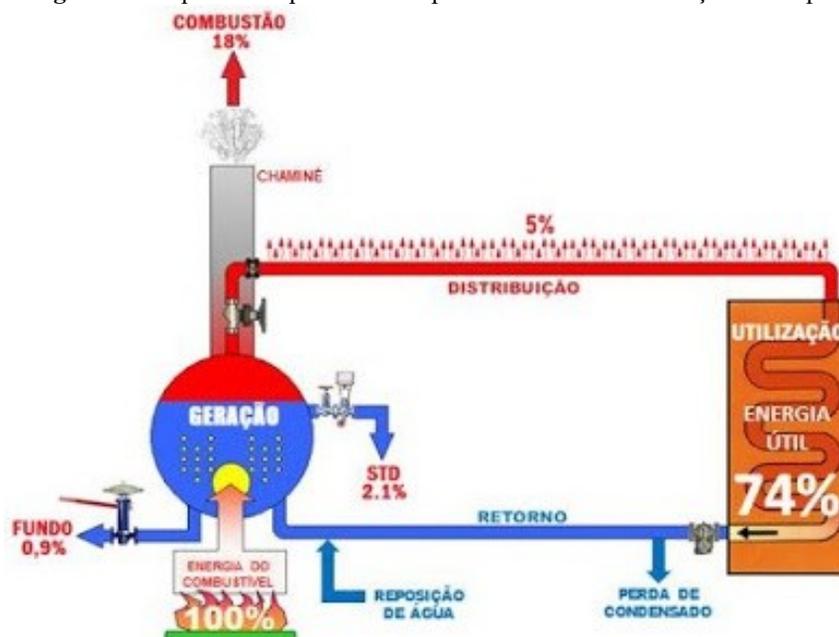
$$\eta = \frac{\Sigma P_t}{\Sigma E_1} \quad (3)$$

Para expressar o rendimento em porcentagem deve-se multiplicar o quociente por 100, ou seja, o rendimento em porcentagem pode ser expresso conforme a equação 4.

$$\eta = \frac{\Sigma P_t}{\Sigma E_1} \times 100 \quad (4)$$

Na Figura 4 pode-se observar um esquema hipotético simplificado das perdas médias em uma instalação de geração e distribuição de calor. No referido esquema, realiza-se a queima de combustível na caldeira com a finalidade de transferir a energia térmica liberada para o fluido de trabalho (PILON et al., 2012). Assim, ΣE_1 é obtida pela queima de combustível e, devido as perdas inerentes ao processo η é 74%, ou seja, têm-se 26% da energia perdida antes que a mesma chegue ao ponto de consumo (TERMIKA, 2023).

¹Figura 4 - Esquema simplificado das perdas médias em instalações de vapor



¹STD: sólidos totais dissolvidos.

Fonte: TERMYKA (2023)

A princípio, como observado no processo hipotético da Figura 4, haveria um total de perdas de energia no processo de 26%, porém conforme Vieira e Rizatki (2018), há diversas formas de se reaproveitar essa energia térmica residual e, uma delas seria através da cogeração de energia elétrica. Segundo os autores, as perdas podem ser minimizadas aproveitando-se a diferença de temperatura para gerar um potencial elétrico, ou seja, pode-se cogerar energia elétrica usando-se o calor residual fornecido nas perdas do processo e, um dos métodos para isso seria o uso do fenômeno de geração de energia conhecido como efeito Seebeck.

2.3 EFEITO SEEBECK, SEMICONDUTORES E MÓDULOS TERMOELÉTRICOS

A descoberta do efeito Seebeck ocorreu em meados de 1821, quando ao unir dois condutores metálicos distintos e expô-los ao aquecimento, Thomas Seebeck percebeu que nas extremidades desses fios surgia uma diferença de potencial elétrico (NUNES, BARBOSA, 2017). Assim, com a descoberta do efeito Seebeck propiciou-se à geração de termoelectricidade, pois aplicando-se calor a junção de dois semicondutores distintos, pode-se gerar um fluxo de elétrons, ou seja, uma corrente elétrica (VIEIRA, RIZATKI, 2018).

Na Figura 5 há uma demonstração simplificada do efeito Seebeck, onde pode-se observar em 5(a) a junção de dois metais distintos sendo exposta ao calor e, nas extremidades do par metálico 5(b) uma carga conectada, configurando o mesmo como um circuito fechado. Ou seja, a figura 5 demonstra que sob a aplicação de uma diferença de temperatura, ocorre o fluxo dos elétrons livres da extremidade quente para a extremidade fria, gerando uma tensão elétrica que é proporcional à diferença de temperatura. Essa eletricidade gerada, pode ser utilizada para muitas finalidades, como representado em 5(c) por uma lâmpada (AMÉRICO et al., 2019).

Figura 5 - Demonstração simplificada do efeito Seebeck



Fonte: Adaptado de AMÉRICO et al., 2019

De acordo com Américo et al. (2019), os diferentes tipos de materiais apresentam comportamentos distintos em relação ao fenômeno Seebeck. Assim, pode-se quantificá-los com o

que é denominada de Coeficiente de Seebeck e calculá-los com a equação 5. Na referida equação, α é o coeficiente de Seebeck (V/K), ΔV é a tensão elétrica gerada pela diferença de temperatura (V), T_q e T_f são as temperaturas nas quais o material está submetido (VIEIRA, RIZATKI, 2018).

$$\alpha = \frac{\Delta V}{T_q - T_f} \quad (5)$$

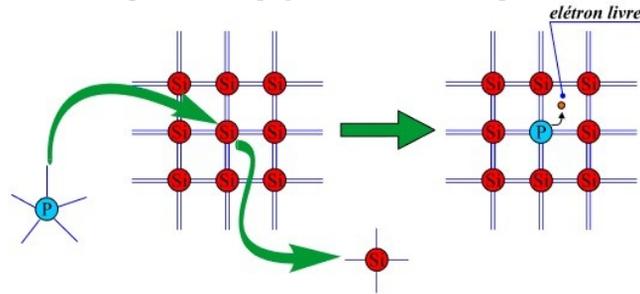
Ao longo do tempo notou-se que esses efeitos termoelétricos, descobertos por Thomas Seebeck, poderiam ser utilizados para geração de eletricidade em processos de recuperação de energias térmicas residuais (MARAN, JUNIOR, 2016). Essa percepção, associada ao grande aumento das indústrias e, conseqüentemente, ao crescente interesse pela cogeração, levou a uma evolução nas formas de se utilizar energias que até então eram perdidas ou descartadas no ambiente (PILON et al., 2012).

Assim, os avanços tecnológicos levaram ao desenvolvimento de novos materiais no âmbito científico, surgindo os primeiros materiais semicondutores, feitos a partir de telureto de bismuto (Bi_2Te_3). Esses semicondutores se mostraram mais eficientes em comparação aos materiais metálicos homogêneos. Logo, criaram-se os primeiros módulos termoelétricos, que eram compostos por n junções entre materiais semicondutores tipo P e tipo N, distribuídos uniformemente para que houvesse um melhor aproveitamento da área de contato (VOLPE, 1993).

2.3.1 Semicondutores Tipo N e Tipo P

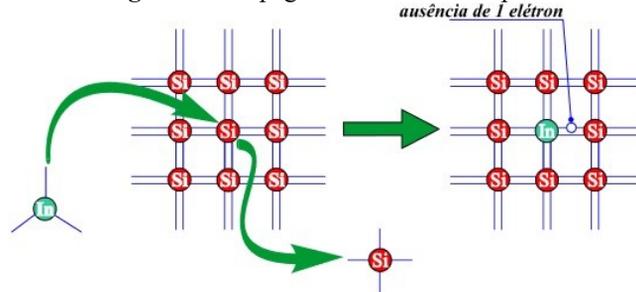
De acordo com Rodrigues (2021) a obtenção desses tipos de materiais semicondutores, tipo N e tipo P, dependem da inserção de impurezas na rede cristalina dos mesmos. Trata-se de um processo químico conhecido como dopagem, onde átomos “estranhos” são introduzidos na estrutura cristalina da substância, alterando as características elétricas da mesma, ou seja, essa inserção aumenta a condutibilidade elétrica do semicondutor.

A Figura 6 representa a dopagem da estrutura cristalina de um semicondutor tipo N, ou seja, insere-se átomos contendo excesso de um elétron de valência em relação aos átomos da rede cristalina. Assim, o semicondutor possui maior número de elétrons livres do que lacunas, o que torna os elétrons livres portadores majoritários e as lacunas portadores minoritários em semicondutores tipo N (RODRIGUES, 2021).

Figura 6 – Dopagem semiconductor tipo N

Fonte: WENDLING, 2011

A Figura 7 representa a dopagem da estrutura cristalina de um semiconductor tipo P, ou seja, insere-se átomos com deficit de um elétron de valência em relação aos átomos da rede cristalina. Assim, o semiconductor possui maior número de lacunas do que elétrons livres, o que torna as lacunas portadores majoritários e os elétrons livres portadores minoritários em semicondutores tipo P (RODRIGUES, 2021).

Figura 7 – Dopagem semiconductor tipo P

Fonte: WENDLING, 2011

A união física de um semiconductor tipo P com um semiconductor de tipo N, forma um cristal semiconductor denominado junção PN. Ao realizar-se essa junção, elétrons do semiconductor tipo n migram para o semiconductor tipo p, assim como as lacunas do semiconductor tipo p se difundem no semiconductor tipo n. Devido a essa migração e difusão, cria-se uma região positiva na extremidade do semiconductor tipo n devido à ausência de elétrons e, cria-se uma região negativa na extremidade do semiconductor tipo p devido à escassez de lacunas. Essas migrações e difusões que ocorrem na junção, geram uma nova região com uma diferença de potencial, que é denominada região de depleção (Halliday et al., 2016c).

Ao conectar-se várias dessas junções eletricamente em série e termicamente em paralelo, forma-se um módulo termoelétrico, ou seja, um gerador termoelétrico. Trata-se de um dispositivo constituído por muitas junções elementares, onde apenas uma produz um baixo nível de potência, mas que devido às várias associações em série obtêm-se potências práticas passíveis de serem utilizadas (RODRÍGUEZ, 2010). Ao longo do tempo foram muitas as pesquisas inovadoras desenvolvidas com a finalidade de viabilizar o uso dos módulos termoelétricos nos mais diversos

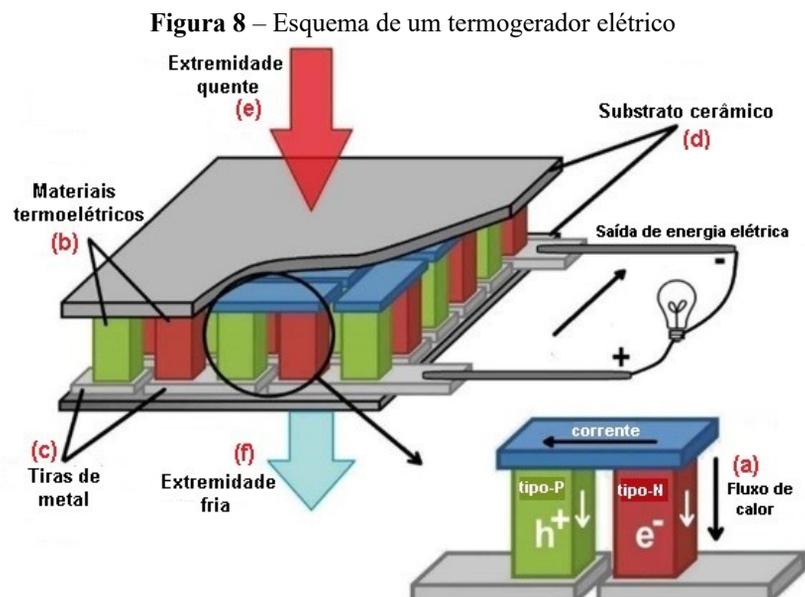
segmentos. Assim, atualmente tem sido amplamente utilizada a geração termoelétrica proveniente do efeito Seebeck (NUNES, BARBOSA, 2017).

2.3.2 Módulos Termoelétricos

Módulos termoelétricos, também conhecidos como TEG, são dispositivos que utilizam como princípio de funcionamento o efeito de Seebeck, cujo objetivo é converter a energia térmica em energia elétrica, ou seja, aplicando-se uma diferença de temperatura nos mesmos obtêm-se diferença de potencial (VIEIRA, RIZATKI, 2018).

Assim, esses dispositivos oferecem soluções de geração de energia elétrica a partir da coleta do calor residual. Possuem as vantagens de serem pequenos, silenciosos e não possuem partes móveis, ou seja, são adequados para uma série de aplicações de engenharia cujo objetivo é reutilizar calor residual para produção de eletricidade e melhorar a economia de consumo de combustível (TEWOLDE et al., 2016).

Na Figura 8 pode-se observar a representação esquemática de um TEG. Em 8(a) têm-se os pares compostos de junções PN ampliados e que são dispostos alternadamente conforme 8(b), conectados com tiras de metal em série 8(c) e encapsulados entre duas placas de cerâmica 8(d), sendo que estas placas são termicamente condutoras e eletricamente isolantes (SANTOS, SPINELLI, 2019).



Fonte: Adaptado de TEWOLDE et al., 2016.

Nos TEGs, o processo de geração de eletricidade, ocorre quando o semicondutor é aquecido em uma das extremidades, conforme indicado na figura 8(e). A energia térmica é transmitida aos elétrons de valência, propiciando que os mesmos saltem de orbitais e tornem-se

elétrons livres, iniciando o deslocamento destes para as zonas mais frias do semicondutor, onde os níveis de energia são mais baixos. Assim, a zona aquecida fica com excesso de cargas positivas, enquanto a zona fria fica com excesso de elétrons livres. Os elétrons livres cessam a migração quando o equilíbrio é atingido, ou seja, quando a tensão se iguala à energia necessária para os elétrons se movimentarem, este cessa. Desta forma, o movimento dos elétrons se mantém enquanto há diferença de temperaturas, ou seja, enquanto houver, entre a parte quente 8(e) e a parte fria 8(f), um gradiente de temperatura, existirá migração de elétrons (SANTOS et al. 2017).

Para que o TEG tenha o melhor rendimento possível, é necessário que os materiais que compõem o mesmo tenham algumas características como elevado coeficiente de Seebeck (α), baixa condutividade térmica (k) e alta condutividade elétrica (σ). Ou seja, com essas três características associadas com a temperatura absoluta (T), pode-se estabelecer a Figura de Mérito (ZT) dos módulos termoelétricos, e expressar o mesmo matematicamente com a equação 6 (VIEIRA, RIZATKI, 2018).

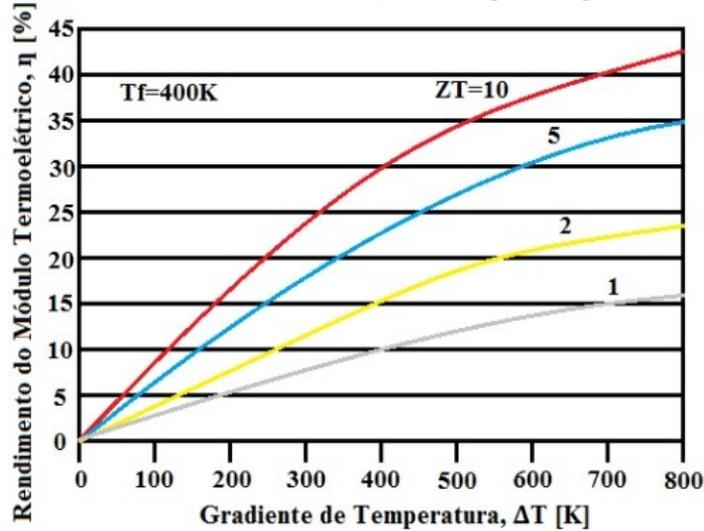
$$ZT = \frac{\alpha^2 \sigma}{k} T \quad (6)$$

De acordo com Junior (2014), a eficiência de conversão dos TEGs está diretamente correlacionada à Figura de Mérito (ZT). Assim, o rendimento (η) de conversão de energia térmica em energia elétrica, pode ser obtido pela equação 7, onde T_q é a temperatura do lado quente e T_f é a temperatura lado frio [$^{\circ}\text{C}$].

$$\eta = \left[\frac{T_q - T_f}{T_q} \right] \left[\frac{(\sqrt{1+ZT}) - 1}{(\sqrt{1+ZT}) + \frac{T_f}{T_q}} \right] \quad (7)$$

Na Figura 9, observa-se a relação do rendimento do módulo (η) com a Figura de mérito (ZT), ou seja, nota-se que a eficiência do módulo está diretamente ligada a ZT . Assim, para obter-se um rendimento de 25% em uma temperatura 300K, seria necessário um material com uma Figura de Mérito (ZT) igual a 10 (JUNIOR, 2014). Porém, os materiais termoelétricos disponíveis atualmente possuem um rendimento entre 5 e 6%, mas uma nova geração de materiais está surgindo no mercado, elevando essa eficiência de conversão de energia térmica em elétrica para uma faixa entre 11 e 14% (AMÉRICO et al., 2019).

Figura 9 – Rendimento do módulo em função de ZT para temperaturas diferentes



Fonte: HENDRICKS e CHOATE, 2006

Vieira e Rizatki (2018), ressaltam que atualmente existem vários fabricantes que disponibilizam no mercado uma série de TEGs com diferentes características entre si, ou seja, alguns apresentam módulos com baixa resistência a temperatura, já outros fabricantes disponibilizam módulos que suportam temperaturas altas podendo ultrapassar os 300 °C. Assim, a aquisição dos módulos termoeletricos deve estar de acordo com a temperatura que será aplicada no lado quente do mesmo.

2.4 TROCADORES DE CALOR

De acordo com Janna (2017), trocadores de calor são dispositivos utilizados para realizar a transferência de calor entre dois fluídos, ou seja, trata-se de sistemas onde o calor de um fluído é transferido para o outro. Essa transferência de calor entre duas ou mais substâncias, cujas temperaturas diferem entre si pode ser realizada entre um fluído líquido e um gasoso, líquido - líquido ou gasoso - gasoso. Seu campo de aplicação é muito vasto, podendo encontrar-se desde os mais tradicionais equipamentos domésticos até nos mais complexos e sofisticados processos industriais.

Para as indústrias os trocadores de calor tornaram-se bastante úteis, levando as mesmas a desenvolverem soluções de otimização destes equipamentos, de modo que a transferência de calor seja realizada com menos perdas e baixo custo. Assim, atualmente os trocadores são projetados não para simplesmente fazerem a troca térmica, mas também propiciar o reaproveitamento da energia térmica residual, transformando os mesmos em ferramentas importantes para a preservação do meio ambiente. Ou seja, buscam-se meios de minimizar as perdas conservando e reaproveitando o máximo possível a energia térmica nos processos de

transferência de calor (SILVA, KONRATH, 2019).

Nos processos de transferência de calor, os trocadores podem ser separados ou classificados em dois tipos, trocadores de contato indireto e trocadores de contato direto. Nos trocadores de contato indireto a transferência de calor ocorre com uma parede separando os dois fluidos. Já nos trocadores de contato direto, os fluidos envolvidos na troca térmica não são separados por uma barreira física, ou seja, entram em contato direto um com o outro. Quanto a geometria dos trocadores de calor, não existe limite para a criação, ou seja, além dos formatos disponíveis no mercado, pode-se desenvolver o formato de acordo com as necessidades da atividade ou ramo que se necessita realizar a transferência de calor (SILVA, KONRATH, 2019).

Quando se opta por adquirir um trocador disponível no mercado, é necessário avaliar as variáveis que podem contribuir para a eficiência na operação do mesmo. Ou seja, deve-se considerar quais variáveis podem aumentar a vida útil e minimizar intervenções de manutenção e reparos. Entre os aspectos e variáveis, tem-se os materiais utilizados na fabricação e suas propriedades térmicas, fator de corrosão, fator de incrustação, espessura de parede, velocidade de escoamento dos fluidos, tipos de fluidos e tipos de aletas ou superfícies (SOUZA & MANZELA, 2015).

A corrosão, conforme Costa et. al (2014) pode ser definida como um processo de deterioração que ocorre em um corpo sólido devido a ação química ou eletroquímica propiciada por um agente agressor ou pelo meio ambiente. Pode ocasionar em trocadores de calor desgastes, diminuição das propriedades mecânicas, imprecisão dimensional e redução na eficiência térmica. Os autores apontam como uma estimativa que, acima de 30% do aço produzido no mundo seja destinado a substituição de peças e partes de equipamentos e de estruturas ou instalações deterioradas pela mesma.

As incrustações, segundo Carvalho et al. (2017), ocorrem nas superfícies dos trocadores de calor aumentando a resistência à transferência de calor, ou seja, diminuem a capacidade de troca térmica dos mesmos. As deposições ocasionadas pelas incrustações também afetam o fluxo dos fluidos, restringindo a passagem dos mesmos pelos trocadores, o que acarreta o aumento da velocidade desses fluidos e, conseqüentemente aumento da pressão de operação. Os autores também apontam, conforme Quadro 6, que a *Standards of the Tubular Exchangers Manufacturers Association* (TEMA), classifica cinco tipos de mecanismos de incrustação, e ressaltam que na maioria dos casos esses mecanismos não ocorrem isoladamente, o que aumenta a complexidade dos efeitos ocasionados pelos mesmos.

Quadro 6 – Mecanismos de incrustação em trocadores de calor

Mecanismo	Efeito
Precipitação	Ocorre principalmente devido à cristalização do fluido com soluções supersaturadas.
Particulados	Partículas de areia, sais ou outras substâncias químicas, inicialmente suspensas na corrente, são posteriormente sedimentadas na superfície de troca térmica.
Deposição por reação química	Em função da temperatura e de agentes facilitadores determinadas reações químicas podem ser favorecidas.
Corrosão	O acúmulo de óxido de ferro altera a condutividade térmica do material de construção do trocador de calor.
Deposição biológica	Crescimento de material orgânico que pode se dar devido ao uso de água proveniente de rios, lagos ou oceanos que não foram adequadamente tratadas para operação em trocadores de calor.

Fonte: Adaptado de Carvalho et al. (2017)

Corrosão e incrustação são fenômenos que dependem do tempo e de mudanças na dinâmica dos trocadores de calor e, caso todas essas variáveis não sejam devidamente controladas, podem ocasionar efeitos prejudiciais nos mesmos ou até no processo geral em que o trocador está inserido (CARVALHO et al., 2017). Portanto, diversas técnicas e/ou processos podem ser empregados no controle e na manutenção da qualidade da água utilizada nos trocadores de calor com a finalidade de sanar ou minimizar esses problemas. O meio mais comum é o tratamento com produtos químicos, devido ao baixo custo e a facilidade de utilização. Podem ser divididos em anti-incrustantes, anticorrosivos, dispersantes e biocidas. Outra opção são equipamentos como osmose reversa, abrandadores, sistema Desmi (resina de troca iônica), mas ainda haverá a necessidade de complementação do tratamento com produtos químicos, porém em menor quantidade (LEGNER, 2023).

Assim, a água utilizada em trocadores de calor deve ter sua qualidade monitorada através de análises laboratoriais, garantindo assim a dosagem correta de produtos químicos quando necessários para o tratamento dela. Desta forma, seja com o uso de equipamentos ou somente com o tratamento químico, se propicia a prevenção dos problemas que podem ser ocasionados pela água nos sistemas de troca de calor (LEGNER, 2023).

2.4.1 Transferência de calor

A transferência de calor é um fenômeno físico que está relacionado a uma diferença de temperatura entre duas regiões no espaço (BERGMAN et al., 2014) cuja combinação de várias leis da física a regem. A literatura reconhece três mecanismos fundamentais para transmissão de energia térmica, são eles, radiação, condução e convecção (GUMERATO et al.,

2007).

A condução, segundo Bergman et al. (2014), pode ser definida como a transferência de calor através de um meio estacionário, sólido ou fluido, que ocorre devido à existência de um gradiente de temperatura no mesmo. Já na convecção, a transferência de calor ocorre entre um fluido em movimento e uma superfície quando eles estiverem em temperaturas diferentes. Na radiação térmica, a emissão de energia ocorre na forma de ondas eletromagnéticas por todas as superfícies com temperatura não nula.

Para condução, de acordo com Gumerato et al. (2007), Fourier em 1822 desenvolveu experimentalmente uma relação matemática (equação 8), onde o calor transmitido (Q_{cond}) [cal ou Joule] é diretamente proporcional à área (A) [m² ou cm²] e ao gradiente de temperatura (T) [K ou °C] das faces das paredes na direção (x) [mm] do fluxo de calor. Para cada tipo de material haverá um coeficiente de proporcionalidade definido pela condutividade térmica (k), que representa a medida da capacidade de conduzir calor, sendo esta uma variável térmica tabelada.

$$Q_{cond} = -k \cdot A \cdot \frac{dT}{dx} \quad (8)$$

A condução de energia térmica na prática se propaga em todas as direções, porém para análise de muitos problemas de engenharia, simplificações de cálculos são feitas, adotando-se que a condução ocorre de forma unidimensional e em regime permanente. Ou seja, quando se tem uma situação em que a espessura é relativamente pequena em relação a área perpendicular ao fluxo, as perdas laterais de calor são desprezadas e a propagação é considerada em um único sentido (INCROPERA, WITT, 2003).

Para a convecção, conforme Bergman et al. (2014), independente da natureza do processo de transferência de calor, a lei do resfriamento de Newton (equação 9), pode representar adequadamente a taxa de transferência. Na referida equação, o fluxo de calor por convecção (Q_{conv}) [W/m²] é proporcional ao gradiente das temperaturas da superfície (T_s) e do fluido (T_∞). O coeficiente de transferência de calor por convecção (h) [W/(m²·K)] é um parâmetro que depende das condições na camada-limite, ou seja, trata-se de um parâmetro influenciado pela natureza do escoamento, geometria da superfície e uma série de propriedades termodinâmicas e de transporte.

$$Q_{conv} = h(T_s - T_\infty) \quad (9)$$

Bergman et al. (2014) ressaltam que qualquer estudo da transferência de calor por convecção pode ser reduzido a um estudo dos procedimentos pelos quais pode-se determinar o h da equação 9 e, que frequentemente a transferência por convecção surge como uma opção de contorno para a solução de problemas envolvendo a condução. Os autores também esclarecem que considerando que o valor de h é conhecido, pode-se resolver tais problemas envolvendo

transferência por convecção utilizando-se valores tabelados como os observados no Quadro 7.

Quadro 7 – Valores típicos do coeficiente de transferência de calor por convecção

Processo	$h(\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K})$
Convecção natural	
Gases	2–25
Líquidos	50–1000
Convecção forçada	
Gases	25–250
Líquidos	100–20000
Convecção com mudança de fase	
Ebulição ou condensação	2500–100000

Fonte: Adaptado de Bergman et al. (2014)

Quanto a equação 9, Bergman et al. (2014) ainda apontam que ao se utilizar a mesma, o fluxo de calor por convecção será considerado positivo se o calor é transferido a partir da superfície ($T_s > T_\infty$) e negativo se o calor é transferido para a superfície ($T_\infty > T_s$). Porém nada impede que a representação da lei de resfriamento seja realizada como na equação 9, na qual a transferência de calor é positiva se ocorrer para a superfície. Um ponto significativo na convecção, é que entre as formas de transferência de calor, apesar de ser considerada a mais complexa de ser compreendida, o valor de transferência de calor mantém-se regular em relação a diferença de temperatura.

Para radiação, segundo Incropera e Witt (2003), deve-se utilizar a equação 10, que representa o cálculo da quantidade de calor emitido por uma superfície real. Nessa equação, segundo os autores, a propriedade emissividade (ϵ) [$0 \leq \epsilon \leq 1$] é uma razão entre a radiação emitida por uma superfície e a radiação emitida por um corpo negro na mesma temperatura. Portanto, a quantidade de calor irradiado de uma superfície real (Q_{rad}) [W/m^2] é diretamente proporcional ao produto entre a emissividade (ϵ), a área da superfície (A) [m^2], a constante de Stefan-Boltzmann (σ) [$5,67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$] e o gradiente de temperatura entre a temperatura do fluido (T_f) [K] e a temperatura da superfície (T_s) [K].

$$Q_{rad} = \epsilon A \sigma (T_f^4 - T_s^4) \quad (10)$$

Para a determinação do fluxo de calor através dos trocadores de calor, pode-se utilizar a equação 11, que descreve as três formas de transferência de calor e representa as Leis de Fourier, Newton e Stefan-Boltzmann na forma de taxa de transferência de calor [W]. Q_{total} é igual ao somatório de Q_{cond} , Q_{conv} e Q_{rad} .

$$Q_{total} = Q_{cond} + Q_{conv} + Q_{rad} \quad (11)$$

2.4.2 Quantidade de calor

Conforme Halliday et al. (2016b) o calor é a energia térmica transferida entre dois sistemas, onde ambos estejam em contato e tenham diferentes temperaturas. Os autores também denotam que a quantidade de calor (Q) [cal] transferido, pode ser quantificado pelo produto do calor específico do material (c) [cal/g °C], a massa (m) [g] da substância e a variação da temperatura (ΔT) [°C] e, ser representada pela equação 12.

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T \quad (12)$$

De acordo com Halliday et al. (2016b) o calor específico de uma substância varia um pouco conforme a temperatura, porém pode-se utilizar valores tabelados na literatura com razoável precisão em temperaturas próximas a temperatura ambiente. A água doce é um exemplo, pois no caso da mesma, o valor do calor específico varia pouco, menos de 1%, entre 0 °C e 100 °C. Assim, dentro da faixa de temperatura entre 0 °C e 100 °C, pode-se utilizar para água doce, segundo os autores, o calor específico de 1,0 cal/g.K ou 4187 J/kg.K.

A massa (m) pode ser medida com uma balança, porém há situações em que tais instrumentos de medição não podem ser utilizados, como, por exemplo, líquidos em tubulações. Uma alternativa para determinar a massa do líquido é através do cálculo de vazão do fluido na tubulação (equação 1).

Como a vazão volumétrica (Q_v) não fornece diretamente a massa, deve-se segundo Çengel e Cimbala (2015), relacionar a mesma com vazão mássica (Q_m) que é dada pelo cociente da quantidade em massa (m) [kg] de um fluido que atravessa a seção transversal de uma tubulação em um determinado intervalo de tempo (t) conforme a equação (13).

$$Q_m = \frac{m}{t} \quad (13)$$

A relação entre as vazões volumétrica e mássica, segundo Çengel e Cimbala (2015), pode ser representada pela equação 14, onde ρ é a massa específica do fluido.

$$Q_m = \rho Q_v \quad (14)$$

Conforme Çengel e Cimbala (2015), a equação (1) ainda pode ser representada de outra forma pela equação 15, com a grandeza física massa (m) isolada.

$$m = \rho Q_v t \quad (15)$$

De acordo com Çengel e Cimbala (2015), a vazão volumétrica (Q_v) também pode ser determinada pelo produto entre a área (S) [m²] da seção transversal do tubo e a velocidade do fluido (v) [m/s] conforme representado pela equação (16).

$$Q_v = Sv \quad (16)$$

2.4.3 Energia consumida por um equipamento elétrico

O consumo de energia elétrica de um equipamento pode ser calculado a partir da potência elétrica dele. Conforme Maceti et al. (2007), a potência (P) [W], que é fornecida pelo fabricante nas especificações contidas no manual de instruções do equipamento, pode ser relacionada, conforme a equação (17), com o tempo (Δt) [s] de funcionamento do equipamento e a quantidade de calor (ΔQ) [W] consumida ou fornecida por ele.

$$P = \frac{\Delta Q}{\Delta t} \quad (17)$$

Nas instituições de ensino e pesquisa é recorrente o uso de equipamentos elétricos para destilação de água. Isso ocorre devido à alta demanda requerida de água destilada para as atividades práticas, desenvolvidas nos laboratórios, sendo extremamente necessária a água destilada para a execução dessas atividades. Porém, os destiladores apresentam um elevado desperdício de energia e água potável, principalmente na etapa de condensação (SIMÕES et al., 2020).

Portanto, para sistemas como os destiladores Pilsen, é extremamente importante conhecer o consumo energético dos mesmos e implementar métodos ou técnicas que reduzam a quantidade de energia e os volumes de água consumidos por estes equipamentos (SOUZA, MANZELA, 2015).

3 OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GERAL

Desenvolvimento e estudo de um sistema para reuso da água, recuperação de energia térmica residual e cogeração de eletricidade com TEG em destiladores de água tipo Pilsen.

3.1.1 Objetivos Específicos

- 1) Desenvolver o projeto estrutural, hidráulico e elétrico do sistema;
- 2) Fazer o levantamento de todo o material necessário e adquiri-lo;
- 3) Fabricar o sistema projetado;
- 4) Implementar as análises e tratamentos de água necessárias no sistema;
- 5) Determinar o ponto de vazão ideal do destilador;
- 6) Analisar o potencial de cogeração de energia elétrica a partir da energia térmica residual presente no efluente;
- 7) Determinar as características do dispositivo de troca de calor entre a água e o módulo termoelétrico;
- 8) Determinar as características do módulo termoelétrico;
- 9) Construir o sistema de recuperação da energia térmica residual e cogeração de energia elétrica;
- 10) Avaliar o comportamento do sistema bem como sua eficiência na recuperação e geração de energia elétrica;
- 11) Verificar os aspectos de viabilidade econômica da aplicação do sistema.

4 METODOLOGIA

4.1 DESENHOS E DIAGRAMAS

A primeira etapa do desenvolvimento do sistema de reuso de água e recuperação de energia térmica residual para cogeração de eletricidade, foi realizar o projeto do mesmo, ou seja, nessa etapa desenvolveram-se os desenhos e diagramas necessários.

Utilizando uma versão gratuita, para estudantes, do software AutoCAD® da empresa Autodesk®, elaborou-se o desenho em perspectiva isométrica direita da estrutura do sistema em forma de bancada,

Utilizando uma concessão gratuita para estudantes da plataforma online Lucidchart®, elaborou-se o diagrama hidráulico do sistema de reuso de água, enquanto o diagrama elétrico do sistema foi elaborado utilizando o software gratuito CADe SIMU®.

4.2 MATERIAIS

O levantamento dos materiais a serem utilizados na construção do sistema de reuso de água em destiladores tipo Pilsen, conforme apresentados no Quadro 8, foi realizado baseando-se no projeto inicial com suas dimensões e o formato desejados para o mesmo. Com o intuito de construir um sistema de baixo custo, que seja facilmente reproduzido por outras Universidades, Escolas ou demais interessados que necessitem do mesmo, optou-se por utilizar, quando possível materiais alternativos e de fácil acesso. Os materiais elétricos, hidráulicos, ferragens e consumíveis necessários foram adquiridos em sites de venda online. Cabe destacar que os valores desses itens se apresentavam em dólar, sendo realizada a conversão para o real no momento da compra. A taxa de conversão do real para o dólar utilizada foi do câmbio oficial segundo o Banco Central (BC) do Brasil, na data de 10/11/2023.

Quadro 8 – Lista de materiais utilizados na construção do sistema

Materiais Hidráulicos		
Descrição do material	Quant.	Finalidade
Mangueira flexível ½"x2,7 mm com conexões ½"	1 und	Entrada de água no sistema
Mangueira flexível ½"x1 m com conexões ½"	1 und	Fluxo de água do filtro para o reservatório
Mangueira cristal 3/8" x2mm	5 m	Fluxo de água entre bomba, destilador, dissipadores de calor e reservatório.
Mangueira cristal 1"x2 mm	1 m	Conexões entre reservatórios e a bomba
Cano de PVC 25 mm	30 cm	Alimentação e fixação do filtro de água
Conexão de PVC tipo "T" ¾" com rosca	1 und	Conexão entre reservatórios
Conexão de PVC 90° ¾" com rosca	1 und	Conexão entre reservatório 2 e bomba
Válvula esfera PVC com rosca ¾"	2 und	Descarte da água. Conexão do reservatório com a bomba
Niple de PVC com rosca ¾"	3 und	Conexões do "T" e saída do reservatório 2
Niple de PVC com rosca ½"	4 und	Conexões do filtro
Bucha de redução rosca ¾ para ½	1 und	Redução na válvula de saída reservatório 2
Espigão reto de PVC ½" com rosca fêmea de ½"	2 und	Conexões da bomba
Espigão reto de PVC 1" com rosca macho ¾"	3 und	Conexão entre reservatórios 1 e 2 e descarte
Espigão 90° de PVC ½" com rosca fêmea de ½"	1 und	Conexão entre reservatório 2 e a bomba
Espigão 90° de PVC ½" x ½"	1 und	Descarte da água dos reservatórios
Flange de PVC para caixa d'água 25 mm rosca ¾"	3 und	Conexão entre reservatórios e bomba
Filtro para caixa d'água com conexões de ½"	1 und	Pré tratamento da água
Bombona de polietileno volume 100 litros	2 und	Reservatórios de água do sistema
Torneira boia plástica para caixa d'água ½"	1 und	Controle de nível máximo dos reservatórios
Torneira plástica ½"	1 und	Ponto de coleta de amostra
Ferragens e Consumíveis		
Descrição do material	Quant.	Finalidade
Abraçadeira de metal tipo "U" ½"	2 und	Fixação do filtro
Abraçadeira de metal tipo "U" 1"	3 und	Apoio da mangueira de alimentação
Dissipador de calor 40x40 mm Seebeck/água	2 und	Transferência de calor entre efluente e TEG
Dissipador de calor 40x240 mm Seebeck/água	2 und	Transferência de calor entre efluente e TEG
Rodizio giratório 3" PVC com trava	2 und	Movimentação da estrutura do sistema
Rodizio giratório 3" PVC sem trava	2 und	Movimentação da estrutura do sistema
Prego com cabeça 12x12	300g	Montagem e fixação da estrutura
Prego com cabeça 13x18	300g	Montagem e fixação da estrutura
Parafuso madeira 3x25 mm	40 und	Montagem e fixação da estrutura
Parafuso madeira 3x40 mm	20 und	Montagem e fixação da estrutura
Dobradiças de aço galvanizado 2"	4 und	Fixação das portas do painel elétrico

Paletes de madeira	6 und	Madeira para a estrutura
Selante para madeira acetinado	300ml	Pintura e proteção
Fita veda rosca 20 mm 10 m	2 und	Vedar conexões hidráulicas
Adesivo cola plástica bisnaga de 17 g	1 und	Colar os tubos e conexões de PVC do sistema
Acrílico transparente espessura 3 mm	1m ²	Estrutura do painel elétrico
Materiais Elétricos		
Descrição do material	Quant.	Finalidade
Bomba de água submersível 12 V	1 und	Fluxo de água entre reservatório e destilador
TEG Pastilha Seebeck 40x40 mm	8 und	Converter energia térmica em elétrica
PWM 5-15 Vcc 3 A	1 und	Controle da rotação da bomba d'água
DC200-50 A	1 und	Parâmetros elétricos do sistema
Cabo flexível vermelho 0,75 mm ²	7 m	Circuitos elétricos de comando e de força
Cabo flexível preto 0,75 mm ²	7 m	Circuitos elétricos de comando e de força
Terminal agulha para cabo 0,75 mm ²	30 und	Conexões elétricas
Termômetro com display digital sensor tipo K'''	3 und	Medir temperatura do ambiente e dos reservatórios
Conector rápido cabo 1,5mm ² 2 entradas 6 saídas	8 und	Conexões elétricas de comando e força
Conector rápido cabo 1,5mm ² 1 entrada 4 saídas	2 und	Conexões elétricas de comando e força
Bateria blindada 12 V	1 und	Armazenar energia elétrica produzida
Chave ON OFF 15A 250 V 2 posições	5 und	Controle dos circuitos elétricos
Display medidor de tensão	1 und	Medir a carga da bateria
Sensor de nível d'água com interruptor	1 und	Indicar nível mínimo nos reservatórios
Módulo interruptor da bomba	1 und	Proteger a bomba de trabalhar sem água
Placa de controle de carregamento automático	1 und	Lógica de carregamento da bateria e alimentação elétrica do sistema
Cooler 12V 150x150 mm	1 und	Circulação de ar no quadro elétrico

Fonte: Autor (2023)

No Quadro 9 estão listadas as ferramentas que foram utilizadas na construção do sistema. As ferramentas e o local para a fabricação foram disponibilizados pela Secretaria de Apoio Científico e Tecnológico (SACT) da Universidade Federal da Integração Latino-Americana (UNILA). Caso o sistema seja reproduzido em outras Universidades, Escolas ou locais que necessitem do mesmo e, não se dispor de todas as ferramentas listadas, as mesmas podem ser substituídas por ferramentas similares.

Quadro 9 – Lista de ferramentas utilizadas na construção do sistema

Descrição
Serra circular de bancada
Serra tico-tico
Furadeira com mandril de 1/2"
Lixadeira para disco de 4"
Serrote
Esquadro de alumínio 90° 30 cm
Jogo de brocas de aço rápido do 3 mm ao 8 mm
Jogo de serra copo para madeira
Jogo de chaves Phillips
Jogo de chaves de fenda
Martelo de unha 500 g
Pé de cabra 300 mm
Torques armador
Alicate de desencapar e grimpar cabos
Lima 8"
Lápis para carpinteiro
Estilete 18 mm
Alicate Universal
Alicate de bico
Alicate de corte

Fonte: Autor (2023)

4.3 PROCESSO DE FABRICAÇÃO E MONTAGEM

Nessa etapa, a partir do desenho dos diagramas elétrico e hidráulico, e com os materiais adquiridos e ferramentas necessárias, realizou-se, conforme a Figura 10, a fabricação e a montagem do sistema.

Figura 10 – Atividades de marcenaria



(a) paletes para desmontagem; (b) paletes desmontados; (c) início da construção do alicerce; (d) alicerce pronto; (e) bancada pronta; (f) sobras de madeiras que foram doadas para serem utilizadas em fornos a lenha.

Fonte: Autor (2023)

O processo de fabricação iniciou com a desmontagem dos 6 paletes vistos na Figura 10(a), os quais tiveram pregos e grampos removidos, ficando os mesmos aptos para serem cortados na serra circular de bancada conforme Figura 10(b). O alicerce da bancada, Figuras 10(c) e 10(d), foi a primeira parte a ser construída, pois o mesmo propicia a sustentação de toda a estrutura. Após finalizada a etapa de marcenaria a bancada ficou conforme se observa na Figura 10(e), ou seja, a mesma possui um tablado inferior, para comportar os reservatórios e a bomba e, um tablado superior para comportar o painel elétrico, os trocadores de calor e as células Seebeck. Na Figura 10(f) estão os retalhos de madeira que sobraram do processo de fabricação, cujo destino foi doação para ser utilizado como combustível em um forno a lenha doméstico, assim como a serragem foi doada para ser utilizada como adubo em produção de hortaliças e pregos e grampos metálicos foram enviados para a coleta seletiva para serem reciclados.

Com a estrutura pronta e os reservatórios posicionados, instalou-se, conforme a Figura 11(a) a tubulação que conecta os dois reservatórios e deriva para uma válvula, cuja finalidade é descartar a água do sistema quando for necessário. Na sequência, conforme Figura 11(b), foram instaladas a bomba para circular a água no sistema, e uma válvula entre a mesma e o reservatório 2, cuja finalidade é interromper o fluxo de água quando intervenções para manutenção forem necessárias na bomba. Prosseguindo as montagens hidráulicas, conforme a Figura 11(d), instalou-se uma torneira para possibilitar a coleta de amostras de água na entrada do sistema e um filtro de carvão ativado para reter impurezas presentes na água. Finalizou-se, conforme a Figura

11(c), instalando a torneira boia plástica, cuja função é controlar o nível e a reposição de água nos reservatórios.

Figura 11 – Montagem hidráulica do sistema

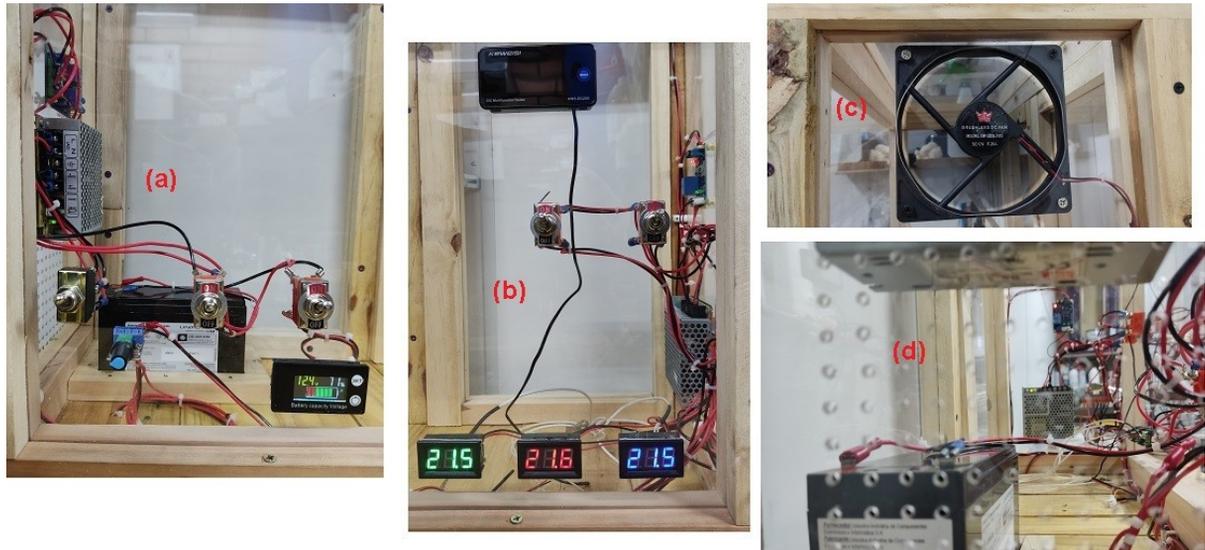


(a) tubulação de conexão dos reservatórios descarte da água; (b) bomba de circulação da água e válvula de manutenção; (c) torneira boia plástica; (d) torneira para coleta de amostras e filtro de carvão ativado.

Fonte: Autor (2023)

O painel elétrico, que se encontra fixado no tablado superior da bancada do sistema, possui as paredes laterais e superior em acrílico, pois permite a visualização de todos os circuitos montados no mesmo. Os componentes do circuito de carregamento e comutação da bateria e o controle PWM da bomba, foram montados conforme se observa na Figura 12(a). Já os componentes dos circuitos de medições de temperatura e produção de energia elétrica com as pastilhas Seebeck, foram montados conforme a Figura 12 (b). A montagem do painel foi finalizada com a instalação de um cooler na parte superior da lateral direita do painel, conforme Figura 12(c), e um aglomerado de furos de 3 mm na parte inferior da lateral esquerda do painel, conforme Figura 12(d), cuja finalidade de ambos é a passagem forçada de ar pelo painel para arrefecimento dos componentes elétricos instalados no mesmo.

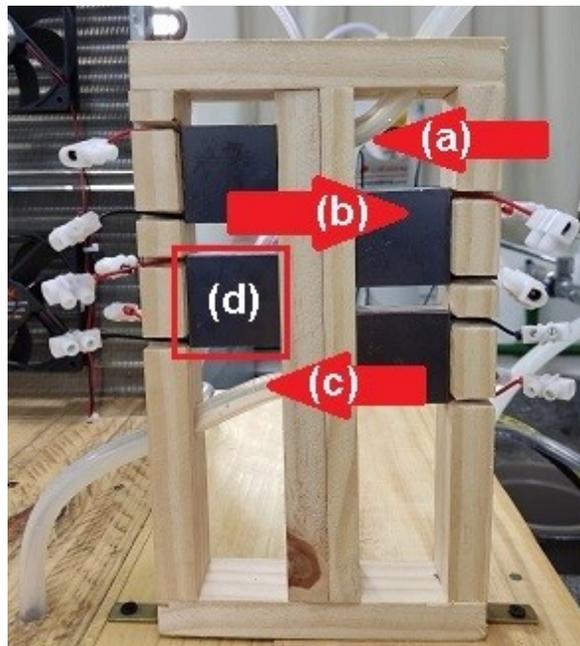
Figura 12 – Montagem elétrica do sistema



(a) PWM, carregamento e comutação da bateria; (b) displays de medições de temperaturas e grandezas elétricas; (c) cooler de arrefecimento do painel; (d) aglomerado de furos para fluxo do ar.
Fonte: Autor (2023)

A última etapa de montagem do sistema foi a do bloco de trocadores de calor e das pastilhas Seebeck. Iniciou-se com a montagem de uma estrutura para suportar os trocadores de calor, que foram conectados em série, de forma que a água aquecida entra nos mesmos conforme a Figura 13(a), passa de um trocador para outro conforme a Figura 13(b) e sai resfriada conforme a Figura 13(c). Concluiu-se o processo de montagem com as células Seebeck, que foram posicionadas sobre as superfícies dos trocadores conforme destacado na Figura 13(d).

Figura 13 – Montagem dos trocadores de calor e pastilhas Seebeck



Fonte: Autor (2023)

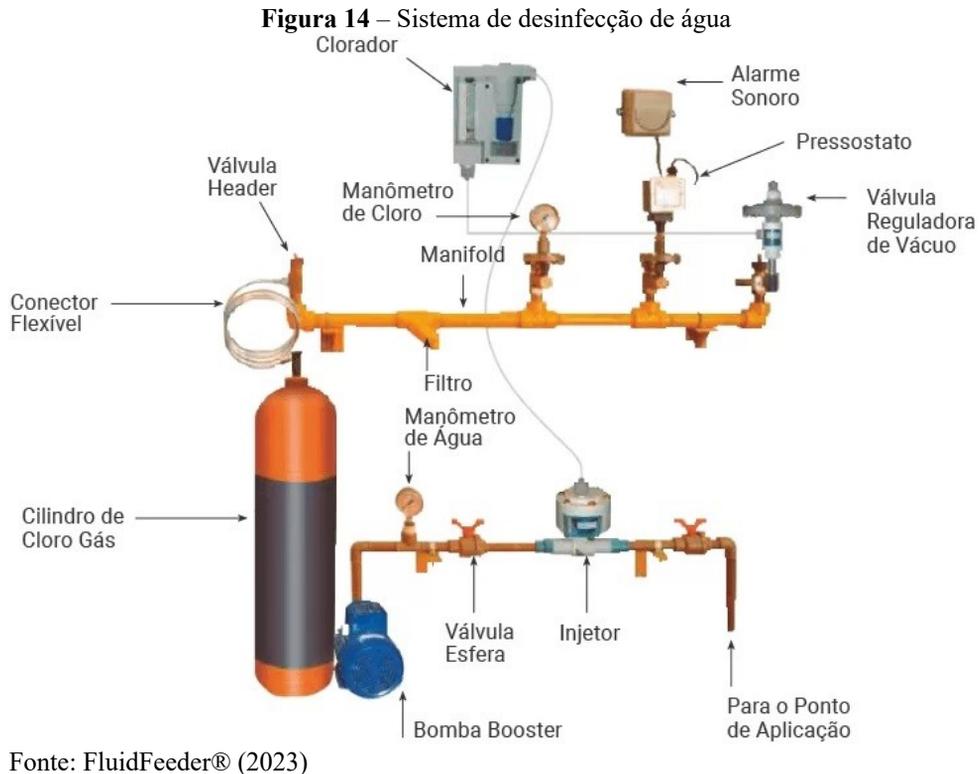
4.4 ÁGUA

4.4.1 Captação e Tratamento

A água utilizada na Universidade Federal da Integração Latino-Americana (UNILA) Campus Jardim Universitário (JU), localizado no endereço Avenida Tarquínio Joslin dos Santos, nº 1000, Foz do Iguaçu/PR, é proveniente de captação em poço artesiano situado na área do referido campus. Após a captação a água não passa por processo de filtragem, sendo que o único processo de tratamento realizado é a desinfecção com cloro.

O tratamento da água utilizado na UNILA, tem por objetivo propiciar que a água consumida no campus atenda aos padrões bacteriológicos e de dosagem de cloro do Ministério da Saúde (MS). A presente portaria “dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade [...]” (BRASIL, 2011). A referida portaria em seu artigo 34 dispõe que “é obrigatória a manutenção de, no mínimo, 0,2 mg/L de cloro residual livre ou 2 mg/L de cloro residual combinado ou de 0,2 mg/L de dióxido de cloro em toda a extensão do sistema de distribuição (reservatório e rede) [...]” (BRASIL, 2011).

Com o intuito de atender a legislação, a adição de cloro na água pode ser realizada com uma das opções de produtos com cloro disponíveis no mercado, ou seja, hipoclorito de sódio (NaClO), hipoclorito de cálcio ($\text{Ca}(\text{ClO})_2$) ou cloro gasoso (Cl_2) (MEYER, 1994). A escolha de qual opção de produto clorado e do processo de desinfecção, conforme a FUNASA (2014), é responsabilidade do gestor do abastecimento, que deverá escolher dentre as opções disponíveis, aquela que seja a mais confiável, eficaz, econômico e permanente. Portanto, dentre as três possibilidades de adição de cloro, a que se optou por utilizar no sistema de tratamento da UNILA foi o cloro gasoso, cujo sistema automático utilizado é similar ao observado na Figura 14.



A adição de cloro gasoso em águas de abastecimento, como ocorre na UNILA, águas cujo valor do pH encontra-se entre 5 e 10, propiciam a formação do ácido hipocloroso (HOCl) e o íon hipoclorito (OCl⁻), que ocorrem em duas etapas as quais são representadas pelas equações químicas I e II (FUNASA, 2014).



Assim, nessas reações do cloro com a água, quem desempenha a função de agente desinfetante é o HOCl (FUNASA, 2014). Como gestora do abastecimento esse é o único tratamento que a UNILA realiza em todo o volume de água captado e distribuído no Campus JU. Apenas nos bebedouros de água, disponibilizados ao público que frequenta o Campus, ocorre uma segunda etapa de tratamento, que é realizada com filtros de carvão ativado instalados na admissão de água dos mesmos.

4.4.2 Análise da Água Realizada pelo Gestor do Abastecimento

Com a finalidade de avaliar a qualidade da água do Campus Jardim Universitário atende aos padrões estabelecidos pelo MS nas portarias nº 888/19 e 2914/11, a UNILA no momento possui contrato com o Laboratório da BrasÁgua Tratamento de Água e Efluentes do Brasil Ltda, cujas análises e relatórios são realizados mensalmente. No Quadro 10 apresentam-se os dados que constam no laudo emitido pela BrasÁgua® em 03 de agosto de 2023, apresentado em anexo nessa

dissertação. Como pode-se observar no referido quadro, todos os parâmetros analisados atendem aos limites estabelecidos pelo MS, ou seja, a água fornecida no JU é considerada potável podendo ser consumida por seres humanos.

Quadro 10 – Análise da água da UNILA Campus Jardim Universitário

Ponto de coleta	Parâmetro	Resultados	Und	Portaria GM/MS N° 888
Saída do poço	Cor aparente	<5	uH	Até 15
	Turbidez	0,46	NTU	Até 5
	pH em campo	9,50		De 6,00 a 9,50
	Temperatura em campo	20,1	°C	N.A
	Teste de P/A de Coliformes Totais e E. Coli	Ausente	-	N.A
Saída do tratamento	Cor aparente	<5	uH	Até 15
	Turbidez	0,44	NTU	Até 5
	Cloro livre em campo	0,78	mg/L	0,20 a 2,00
	pH em campo	9,1		De 6,00 a 9,50
	Temperatura em campo	21,2	°C	N.A
	Teste de P/A de Coliformes Totais e E. Coli	Ausente	-	N.A
Cozinha do restaurante	Cor aparente	<5	uH	Até 15
	Turbidez	0,45	NTU	Até 5
	Cloro livre em campo	0,71	mg/L	0,20 a 2,00
	pH em campo	9,20		De 6,00 a 9,50
	Temperatura em campo	21,3	°C	N.A
	Teste de P/A de Coliformes Totais e E. Coli	Ausente	-	N.A

Fonte: adaptado de BrasÁgua, (2023)

4.4.3 Alimentação, Tratamento e Análise da Água no Sistema de Reuso de Água

A água que alimenta o sistema de reuso de água e recuperação de energia térmica residual para cogeração de eletricidade, é proveniente da tubulação de água potável do Laboratório 04 do bloco de laboratórios de ensino no Campus JU da UNILA. Como mencionado, a água encontra-se dentro dos parâmetros de potabilidade, ou seja, pode ser utilizada para o consumo humano. Porém, como ocorre em todos os bebedouros do Campus JU, também foi instalado um filtro de carvão ativo na entrada de água do sistema, cujas características técnicas podem ser consultadas no Quadro 11.

Quadro 11 – Informações técnicas do filtro cavalete para caixa d' água

Filtro Cavalete Caixa D'água Carvão Ativado Prata Coloidal	
Marca	WFS
Modelo	C934CB
Cor	Branco
Altura	9 3/4"
Conexões de entrada e saída	1/2"
Vazão máxima	1000 litros por hora
Elemento filtrante	Carvão ativo
Porosidade do filtro	0,5-15 microns
Temperatura mínima	5 °C
Temperatura máxima	90 °C
Vida útil	6 meses ou 3000 litros
Objetivo	Redução de cloro, gostos e odores; Contenção de materiais particulados.

Fonte: adaptado de WFS (2023)

O objetivo da instalação do filtro é a retenção de possíveis materiais particulados provenientes da captação no poço artesiano, oxidação de tubulações e falhas na vedação das caixas d' água, além de reduzir a quantidade de cloro proveniente do tratamento. Portanto, conforme se observa na Figura 15, a água chega ao sistema em 15(a) através de uma mangueira flexível de 1/2", pode ser coletada em 15(b) se necessário na torneira plástica de 1/2", é admitida no filtro em 15(c) e sai do mesmo em 15(d) para chegar ao reservatório em 15(e) na torneira boia plástica.

Figura 15 – Alimentação de água no sistema de reuso de água

(a) entrada da água no sistema; (b) torneira plastica; (c) entrada do filtro; (d) saída do filtro; (e) torneira boia plástica; (PCP1) ponto de coleta 1; (PCP2) ponto de coleta 2.

Fonte: Autor (2023)

Como se trata de um sistema fechado, com um volume de 0,2 m³, determinou-se apenas 2 pontos de coleta para análise. Os pontos são antes do filtro através de uma torneira plástica que pode ser visualizada na figura 15(b), a qual denominou-se como ponto de coleta 1 (PC1) e após o processo de filtragem no reservatório 1 visualizada na Figura 15(e), o qual denominou-se ponto de coleta 2 (PC2).

De acordo com ANA (2011) a etapa de coleta de amostras é um processo crucial, na qual o material a ser coletado deve representar de forma fidedigna o local amostrado. Portanto, a seleção dos pontos de coleta, das técnicas adequadas de coleta e preservação das amostras foram elaboradas com base no Guia Nacional de Coleta e Preservação de Amostras de 2011 da referida agência governamental. Visto que esses procedimentos são primordiais para a confiabilidade e representatividade dos dados a serem gerados, elaborou-se um Procedimento Operacional Padrão (POP) para coleta de amostra de água do sistema de reuso, que se encontra no apêndice A nessa dissertação.

Como a gestora realiza as análises na captação e distribuição para comprovar a potabilidade da água, selecionaram-se para monitoramento da água reutilizada, apenas parâmetros que poderiam apresentar variações ao longo do tempo de reuso. As análises físico-químicas e microbiológica definidas para a água do sistema, foram pH, condutividade, dureza total, cloro livre, sólidos totais dissolvidos e presença de bactérias heterotróficas. O pH foi medido com um pHmetro da marca TECNOPON® modelo mPA-210 e a condutividade foi medida com um condutivímetro da marca TCNOPON® modelo mCA-150. Os procedimentos analíticos foram realizados seguindo as metodologias da FUNASA (2004) para dureza total e cloro livre, Matias (2019) para sólidos totais dissolvidos e FUNASA (2013) para detecção de bactérias heterotróficas. Para uma amostragem adequada realizaram-se 6 coletas nos pontos PC1 e PC2 nas datas: 16/10/2023, 23/10/2023, 30/10/2023, 06/11/2023, 13/11/2023 e 20/11/2023.

No Quadro 12 encontram-se as análises físico-químicas e microbiológica definidas para a água do sistema, os potenciais problemas correlatos caso não haja o monitoramento das mesmas, os pontos de coleta da água e a periodicidade das análises.

Quadro 12 – Análises x problemas potenciais x pontos de coleta x periodicidade

Análise	Problemas Potenciais	PC1	PC2	Periodicidade
Dureza total	Incrustações		X	7 dias
Cloro livre	Corrosões	X	X	7 dias
STD (Sólidos Totais Dissolvidos)	Corrosões e incrustações	X	X	7 dias
Presença de bactérias heterotróficas	Corrosões e incrustações		X	7 dias

Fonte: Autor (2023)

A análise da dureza da água determina a soma dos cátions bivalentes que estão presentes na mesma, sendo expressa em termos da quantidade equivalente de carbonato de cálcio (CaCO_3). Íons metálicos como cálcio e alcalino-terrosos também influenciam na dureza da água, sendo que o cálcio e o manganês, normalmente apresentam-se associados a íons sulfato. Demais cátions como alumínio, ferro, estrôncio, zinco e manganês, também podem conferir dureza à água, sendo que os cátions associados a nitritos e a cloretos são os que ocorrem em menor frequência. Assim, a dureza da água pode ser obtida pela soma das durezas de compostos com carbonato e sem carbonato, ou seja, com compostos de dureza temporária e de dureza permanente (PARRON et al., 2011). A dureza pode ser obtida por titulometria, cujo procedimento, disponibilizado por FUNASA (2004), encontra-se no anexo B dessa dissertação.

A análise de cloro livre determina a presença de cloro ativo na água, pode ser realizada por titulometria, cujo procedimento, disponibilizado por FUNASA (2004), encontra-se no anexo C dessa dissertação.

A análise de sólidos dissolvidos na água indica a presença de compostos como sais inorgânicos e matéria orgânica que se dissolvem na água. O tamanho desses sólidos é menor que 2 microns e em sua maioria encontram-se na forma de íons. O procedimento para determinação de sólidos dissolvidos totais, encontra-se como anexo D dessa dissertação e foi adaptado de Matias (2019).

A presença de bactérias heterotróficas, conforme Souza et al. (2009), fornece de forma ampla, informações bacteriológicas sobre a qualidade da água. Trata-se de uma análise bacteriológica, com detecção não específica de bactérias ou esporos de bactérias, provenientes de origem fecal, da flora natural da água ou resultante da formação de biofilmes. O procedimento para contagem de bactérias heterotróficas, disponibilizado por FUNASA (2013), encontra-se como anexo E dessa dissertação.

4.5 RECUPERAÇÃO DE CALOR

4.5.1 Dados Técnicos do Destilador Tipo Pilsen

Conforme sugerido por Rondon et al. (2017), iniciou-se realizando a identificação dos dados técnicos e de funcionamento do equipamento, fornecidos pelo fabricante, ou seja, realizou-se o levantamento das informações fornecidas no manual do equipamento, que podem ser visualizadas no Quadro 13. O levantamento dessas informações possibilita saber se o equipamento está funcionando adequadamente como fora projetado, podendo estimar o volume esperado de condensado e de efluentes e, posteriormente confrontar esses dados teóricos com os obtidos na

prática.

Quadro 13 – Dados técnicos do destilador tipo Pilsen

Fabricante	MTB CIENTÍFICA Equipamentos para Laboratório
Modelo	SSDEST 10L
Medidas externas	20x30x24 cm
Tensão de alimentação	220 V (bifásico)
Potência	7000 W
Consumo	10 vezes maior que o rendimento
Sistema de aquecimento	Resistência tubular blindada em aço inox 304
Material	Tubo de destilação, tampa e caldeira em aço inox 304
Caldeira	Aço inox 304 sem soldas ou emendas

Fonte: MTB CIENTÍFICA (2021)

Destaca-se que o aço utilizado na fabricação dos componentes do destilador, conforme observado no quadro 13, é classificado como aço inoxidável, que possui em sua composição química acima de 10,5% de cromo (Cr). Essa composição confere ao aço inox 304 baixas taxas de corrosão e pouca perda de massa. Ou seja, há alta resistência à corrosão propiciada pela alta porcentagem principalmente de cromo, associada a outras ligas também presentes em sua composição, conferindo um grande diferencial e proporcionando um funcionamento sem contaminação tanto no produto quanto no efluente produzidos no processo de operação do destilador (DINIZ et al., 2016).

4.5.2 Determinação da vazão ideal

Como no regime real de trabalho, o volume de condensado e efluentes depende da vazão de alimentação do equipamento. Adaptando-se o método de Rondon et al. (2017), realizou-se a verificação da vazão que propicia a otimização do processo. Portanto, realizaram-se 5 medições para verificar as variações de tempo e do volume de geração de efluente no sistema, seguindo os 13 passos do quadro 4, apresentado na revisão bibliográfica, porém com alterações nos passos 1, 3 e 11. Portanto, no Quadro 14 pode-se observar os procedimentos adaptados, cuja modificação consistiu na substituição do controle de vazão que era realizado com uma válvula manual, para um controle de vazão realizado com um PWM, ajustando-se a rotação da bomba.

Quadro 14 – Procedimento adaptado para determinação da vazão ideal do destilador

Passo	Procedimento
1	Definir 5 posições no PWM que controla a rotação da bomba d'água.
2	Colocar a proveta 1 na saída da água destilada a fim de captar a mesma.
3	Acionar a bomba d'água na 5ª posição de abertura.
4	Acionar o equipamento.
5	Acionar o cronometro quando começar a sair água destilada.
6	Imediatamente, com a proveta 2, realizar a coleta da água residual.
7	Quando a proveta 2 estiver cheia deve-se substituí-la pela proveta 3.
8	Anotar o volume preenchido na proveta 2 e após descartar o mesmo.
9	Repetir os passos 7 e 8, intercalando o uso das provetas 2 e 3, até completar o volume de 0,5 L na proveta 1.
10	Ao completar 0,5 L na proveta 1 parar o cronometro imediatamente e anotar o tempo registrado.
11	Descartar o volume da proveta 1 e recolocá-la para coleta ao iniciar o próximo ciclo de medição.
12	Sem desligar o equipamento, passar o PWM para a próxima posição, esperar 15 minutos e repetir os procedimentos do 5 ao 11 para as outras 4 posições da válvula.
13	Aplicar os dados coletados na equação 1 para determinar as vazões de água destilada e residual.

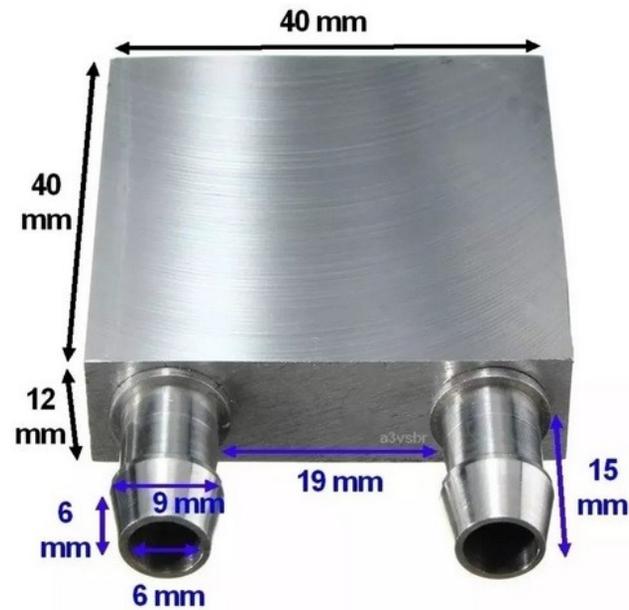
Fonte: Adaptado de Rondon et al., 2017.

4.5.3 Recuperação do Calor Residual

O presente trabalho foca no resfriamento e reuso do efluente, portanto, a energia a ser recuperada está contida na água que retorna aos reservatórios do sistema, ou seja, não se trabalhou com a recuperação de calor residual nas superfícies do equipamento, ficando a mesma como sugestão para trabalhos futuros.

Nessa etapa buscou-se as alternativas de trocadores de calor disponíveis no mercado. Encontraram-se trocadores de calor específicos para pastilhas Seebeck e Peltier, porém todas as opções eram fabricadas em alumínio. O que diferiu entre as opções disponíveis no mercado foram as dimensões estruturais, ou seja, todas tinham a mesma largura, espessura e diâmetro das conexões, diferindo apenas no comprimento. Optou-se pela aquisição do menor tamanho, que comporta duas pastilhas uma em cada face do trocador, conforme observado na Figura 16, considerando como principal fator de tomada de decisão o custo-benefício.

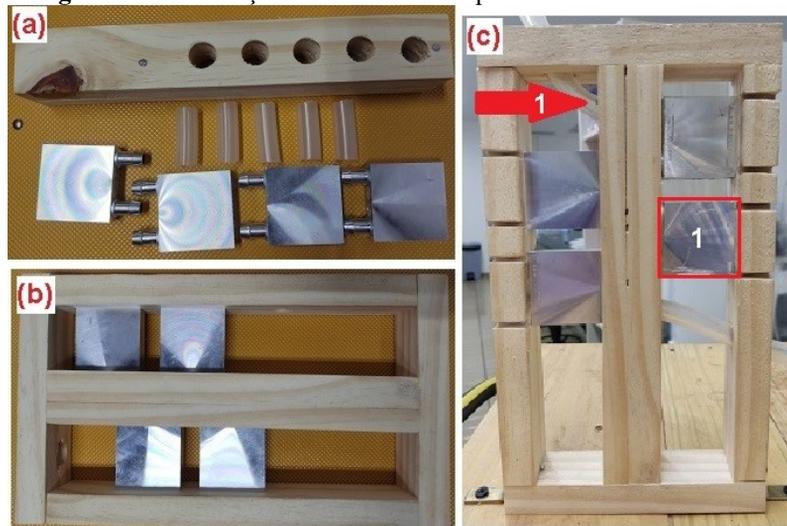
Figura 16 – Trocador de calor para pastilha Seebeck e água



Fonte: Mercado Livre (2023)

Após a aquisição dos trocadores de calor, realizou-se a confecção de uma estrutura para suportar os mesmos. Conforme observado na figura 17(a), foram feitos furos na coluna central do suporte para que os trocadores de calor fossem conectados em série. Ainda na figura 17(a) é possível observar os 4 trocadores de calor que foram utilizados no experimento e as mangueiras de silicone utilizadas para vedar a conexão entre eles. Na figura 17(b) observa-se os trocadores de calor conectados com a estrutura de madeira parafusada e, na figura 17(c) observa-se a mesma na bancada que foi conectada ao destilador Pilsen.

Figura 17 – Confecção da estrutura de suporte dos trocadores de calor



Fonte: Autor (2023)

Depois de conectar os trocadores de calor na tubulação do efluente, ligou-se o

destilador Pilsen e esperou-se 15 minutos para serem iniciadas as medições. Determinou-se esse intervalo de tempo para garantir que no momento das medições as temperaturas do efluente e dos trocadores de calor já estivessem em seus valores máximos.

A primeira medida realizada foi a temperatura do efluente no interior do trocador de calor. O modelo de trocador de calor utilizado nessa pesquisa, não possibilita medições em seu interior sem alterar as características físicas do mesmo e da vazão do efluente. Portanto, adotou-se como ponto de medição a entrada do efluente nos trocadores de calor conforme indicado pela seta 1 na figura 17(c). Com o auxílio de um termômetro digital tipo espeto, da marca INCOTERM® modelo 6132, inserido na tubulação na entrada do trocador de calor, mediu-se a temperatura do efluente.

A segunda medida realizada foi a temperatura das superfícies dos trocadores de calor. Utilizando um termômetro infravermelho da marca SKILL-TEC® modelo SKTI-550, mediu-se a temperatura nas oito faces dos 4 trocadores de calor, conforme o exemplo da região de um dos trocadores de calor indicada pelo quadrado 1 na figura 17(c).

A terceira medida realizada foi da temperatura ambiente do Laboratório com um termômetro digital com sensor externo, marca INCOTERM® e modelo 7427.02.0.00. A temperatura foi monitorada durante uma hora, com um intervalo de cinco minutos entre cada medição.

Com o valor da vazão volumétrica que foi medida na etapa de determinação da vazão ideal, utilizando a equação 15, determinou-se a massa do fluido que escoou pela tubulação no intervalo de tempo de 1 hora.

Com o auxílio da equação 12, calculou-se a energia térmica que pode ser recuperada do efluente, nesse período. Para realização do cálculo com a equação 12, determinou-se o gradiente de temperatura, ou seja, a diferença entre a temperatura do efluente e a temperatura ambiente.

Utilizando a equação 11 realizou-se o cálculo da quantidade de calor transferido pelos trocadores de calor e estimou-se o total de trocadores necessários para se recuperar toda a energia térmica calculada. Com o auxílio da equação 17, determinou-se a quantidade de energia térmica produzida pela resistência elétrica do destilador Pilsen e avaliou-se quanto dessa energia pode ser recuperada no efluente.

4.6 COGERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Nessa etapa buscaram-se as alternativas de TEG disponíveis no mercado. Foram

identificadas várias opções disponíveis, porém foi selecionada para aquisição as células cujas características elétricas, fornecidas pelo fabricante, podem ser observadas no Quadro 15. Cabe enfatizar que o fabricante, o qual denominaremos como fabricante “A”, disponibiliza apenas as informações da tensão e a corrente produzidas em relação ao gradiente de temperatura entre a face quente e a face fria da pastilha Seebeck, ou seja, não há a disponibilização do *datasheet* das pastilhas utilizadas nesse trabalho.

Quadro 15 – Características elétricas das células Seebeck segundo o fabricante

Fabricante	Grandeza física produzida	Gradiente de temperatura em °C				
		20	40	60	80	100
A	Tensão (V)	0,97	1,8	2,4	3,6	4,8
	Corrente (mA)	225	368	469	558	669

Fonte: Autor (2023)

Realizaram-se testes de funcionamento das pastilhas Seebeck, com a finalidade de simular e avaliar o desempenho teórico no regime real de trabalho. Para a execução do primeiro ensaio, foram fabricados cubos de gelo a -20 °C, em um freezer horizontal de 534L, marca Consul®, modelo CHB53EB. Os cubos foram fabricados com as mesmas dimensões das faces das células Seebeck, ou seja, 40 mm x 40 mm. As faces das pastilhas foram cobertas com o gelo a -20 °C e, água nas temperaturas de 0 °C, 20 °C, 40 °C, 60 °C e 80 °C, medidas com um termômetro digital tipo espeto, da marca INCOTERM® modelo 6132, foi circulada nos trocadores de calor. Com multitestes da marca Minipa®, modelo MINIPA-ET-1100B, foram realizadas as medições da diferença de potencial e corrente elétrica produzidas pelas células Seebeck. Ao término do primeiro teste se realizou um segundo teste, sem a presença do gelo na face fria, ou seja, a troca de calor com o ambiente ocorreu de forma natural.

Com a finalidade de determinar as características do regime de trabalho real, realizaram-se as configurações de montagem elétrica, conforme o Quadro 16. Com multitestes da marca Minipa®, modelo MINIPA-ET-1100B, foram realizadas as medições da diferença de potencial e corrente elétrica produzidas pelas células Seebeck em cada configuração de montagem.

Quadro 16 – Configurações de montagem elétrica das pastilhas Seebeck

Configuração	Descrição da montagem
1	Uma pastilha
2	Duas pastilhas em série
3	Três pastilhas em série
4	Quatro pastilhas em série

Fonte: Autor (2023)

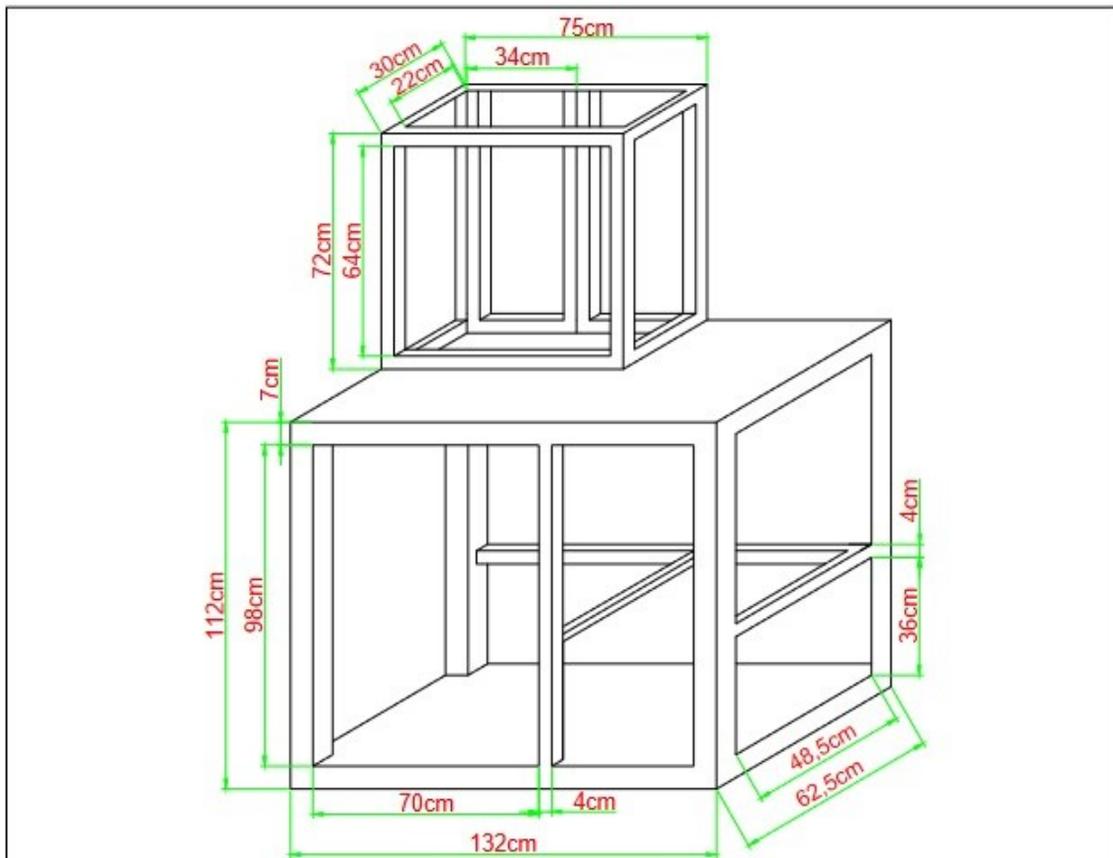
Após as medições, realizou-se o tratamento dos dados coletados, ou seja, analisou-se a produção de energia elétrica em diferentes configurações de montagem das pastilhas Seebeck, a fim de determinar qual dessas configurações é a mais viável e se realizou uma análise da viabilidade econômica do sistema de cogeração implantado.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 PROJETO E FABRICAÇÃO DO SISTEMA DE REUSO DE ÁGUA

A primeira etapa da fase de projeto foi o desenho do sistema de reuso de água, apresentado na Figura 18. Feito em perspectiva isométrica, o esquema forneceu o dimensionamento da bancada e permitiu uma visão do formato da mesma. A escolha da perspectiva isométrica se justifica devido a síntese do objeto propiciada pela mesma, pois representa-se as três faces da bancada com uma perspectiva que resume a mesma em um único desenho. Essa forma de representar o objeto o deforma menos, pois a perspectiva isométrica mantém as proporções da altura, da largura e do comprimento do objeto representado. Assim, o desenho é representado com clareza, facilitando a compreensão de todos os envolvidos no projeto ou que queiram replicá-lo no futuro, possibilitando aplicar e/ou extrair medidas e escalas do mesmo.

Figura 18 – Desenho em perspectiva isométrica da bancada do sistema de reuso de água e cogeração

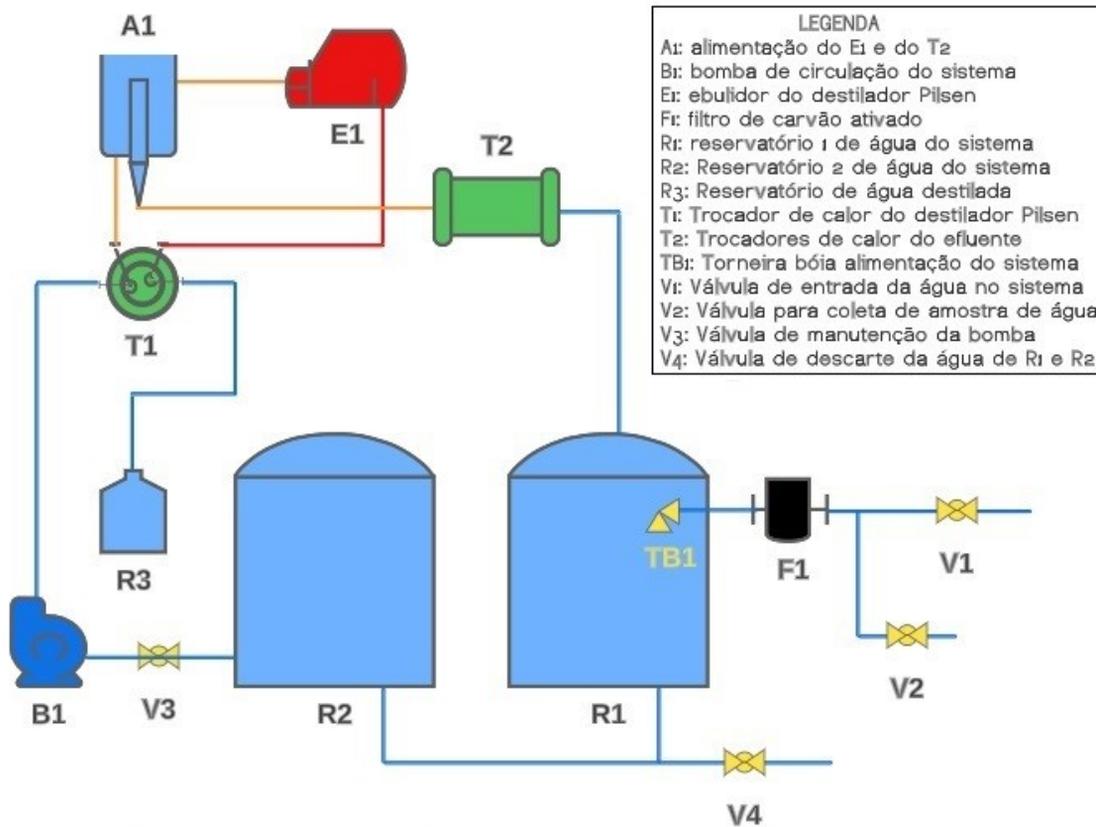


Fonte: Autor (2023)

A segunda etapa da fase de projeto, foi a elaboração do diagrama hidráulico, apresentado na Figura 19. O diagrama hidráulico propicia a visualização do funcionamento do fluxo de água e identificação dos componentes que integram o mesmo. Trata-se de uma ferramenta

essencial, tanto para projetar, como para compreender e diagnosticar eventuais falhas, ou seja, com o diagrama hidráulico do sistema, é possível identificar de forma rápida as válvulas, conexões, bombas e outros elementos que compõem o mesmo, tanto em situações de operação quanto em situações de manutenção.

Figura 19 – Diagrama hidráulico do sistema de reuso de água



Fonte: Autor (2023)

No Quadro 17, estão listados os componentes do diagrama hidráulico do sistema de reuso de água e a descrição de suas respectivas funções. A descrição da função dos componentes contidos no diagrama, possibilita a compreensão que cada um desempenha no sistema representado pelo mesmo, ou seja, o Quadro 17 é um recurso criado para auxiliar na leitura e compreensão do diagrama, facilitando que leitores não ambientados com simbologias e esquemas hidráulicos possam compreender os mesmos.

Quadro 17 – Componentes do diagrama hidráulico e suas respectivas funções

Componente	Descrição da função
A1	Alimentar o ebulidor com água pré-aquecida e descartar o excedente como efluente.
B1	Realizar o recalque da água do reservatório 2 até o destilador Pilsen.
E1	Passar a água do estado líquido para o gasoso.
F1	Filtrar a água através do leito poroso de carvão ativo e reduzir o cloro com a prata coloidal.
R1	Reservatório para armazenamento, onde ocorre a reposição de água no sistema e retorno do efluente.
R2	Reservatório para armazenamento, onde ocorre a saída da água para alimentação da bomba de recalque.
R3	Reservatório para coletar a água destilada, ou seja, armazena a produção do sistema.
T1	Trocador de calor do destilador Pilsen responsável por condensar a água destilada e pré-aquecer a água para o ebulidor.
T2	Trocadores de calor responsáveis por resfriar o efluente e viabilizá-lo para retornar ao sistema através do reservatório 1.
TB1	Controle simultâneo da reposição da água no sistema e dos níveis da mesma nos reservatórios 1 e 2.
V1	Interromper o fluxo de água no caso de manutenções necessárias no filtro ou na torneira boia.
V2	Possibilitar a coleta de amostras da água que entra no sistema antes do processo de filtração.
V3	Interromper o fluxo de água em caso de manutenções necessárias na bomba de recalque.
V4	Possibilitar o descarte da água armazenada nos reservatórios 1 e 2 quando necessário.

Fonte: Autor (2023)

A última etapa da fase de projeto, foi a elaboração do diagrama elétrico que se observa na Figura 20. É uma representação do esquema elétrico do sistema de reuso de água, que propicia a visualização da lógica dos circuitos de acionamento e controle, assim como a identificação de componentes que integram o mesmo. Trata-se de um instrumento primordial, tanto para fabricar, como para compreender e diagnosticar eventuais falhas, ou seja, com o diagrama elétrico do sistema, é possível identificar de forma rápida os condutores, interruptores, sensores e outros elementos que compõem o mesmo, facilitando a sua identificação em situações de operação ou em intervenções para manutenção.

Quadro 18 – Componentes do diagrama elétrico e suas respectivas funções

Componente	Descrição da função
B1	Bomba de circulação de água no sistema.
B12Vcc	Bateria 12 Volts para suprir o sistema na ausência de produção de energia ou falta de fase.
C1	Cooler para arrefecimento dos componentes painel elétrico.
CNB	Controle de carregamento automático da bateria e comutação em ausência de cogeração ou falha na entrada de serviço da concessionária de energia.
CSS	Chave seletora do sistema com a fonte 1 ou com a geração com células Seebeck.
DT1	Display do termômetro do reservatório 1.
DT2	Display do termômetro do reservatório 2.
DT3	Display do termômetro da temperatura ambiente.
DMCB	Display do medidor da carga da bateria.
F1	Fonte de alimentação 12 V 4,2 A para carregamento da bateria em caso de ausência de geração de eletricidade com as pastilhas Seebeck.
F2	Fonte de Alimentação 12 V 4,2 A para os displays dos termômetros e do cooler.
GCS	Geração de eletricidade com as células Seebeck.
IF1	Interruptor para desligar a fonte 1
IF2	Interruptor para desligar a fonte 2
L	Fase da rede de fornecimento de eletricidade da concessionária de energia.
N	Neutro da rede de fornecimento de eletricidade da concessionária de energia.
PE	Proteção elétrica/circuito de aterramento
PWM	Controle da velocidade da bomba usando modulação por largura de pulsos.
SH	Derivador resistivo para medição da corrente elétrica gerada pelas pastilhas Seebeck
SK1, SK2 e SK3	Termopares tipo “K” dos displays 1, 2 e 3 das medições de temperaturas.
SNR	Sensor de nível baixo do reservatório que interrompe o funcionamento da bomba, para a mesma não ser danificada trabalhando a vazio.

Fonte: Autor (2023)

Visando a diminuição de custos do projeto e ações sustentáveis na fabricação, buscou-se utilizar o máximo de materiais reaproveitados. Além das 2 bombonas de 100 litros e dos paletes de madeira provenientes da indústria alimentícia, também foram reutilizados 2 trocadores de calor aletados, 2 coolers, 1 controlador de temperatura e 1 sensor PT100, todos provenientes de equipamentos desativados que seriam descartados como sucata.

Outra ação positiva, foi a destinação dos resíduos, sobras de madeira e serragem, provenientes das atividades de marcenaria executadas na fabricação. Ambas foram doadas para serem usadas respectivamente em forno a lenha e adubação de hortaliças. Também os grampos e pregos provenientes da desmontagem dos paletes, que não puderam ser reutilizados foram

destinados para o lixo reciclável.

5.2 DETERMINAÇÃO DA VAZÃO IDEAL DO DESTILADOR PILSEN

Na Tabela 1 encontram-se os dados coletados na determinação da vazão ideal do destilador. As posições P1 e P2 do controlador PWM, demonstraram-se inviáveis de serem utilizadas, pois devido à baixa vazão das mesmas o destilador superaqueceu, acionando o termostato de segurança que interrompeu seu funcionamento. Porém, as posições P3, P4 e P5 demonstraram-se viáveis, sendo que a melhor vazão encontrada foi na posição P3 de 159,7 L/h. Essa foi considerada a vazão mínima para o funcionamento adequado do equipamento de destilação, sendo também a vazão que tem o melhor custo-benefício entre a água destilada e o volume de efluente produzidos.

Tabela 1 – Dados da determinação da vazão ideal

Posição do PWM	Volume de produto (L)	Volume de efluente (L)	Tempo (h)	Vazão (L/h)
P1	-	-	-	-
P2	-	-	-	-
P3	0,5	11,1	0,0695	159,7
P4	0,5	12,2	0,0703	173,5
P5	0,5	14,4	0,0600	240,0

*análise não realizada.

Fonte: Autor (2023)

Além disso, de acordo com os dados apresentados na Tabela 1, se não for utilizado um sistema de reuso da água, para cada hora de funcionamento do destilador, no mínimo, 159,7 litros de água seriam descartados no esgoto. Também se observa que sem definir a vazão ideal, a utilização de vazões abaixo da mínima definida poderia afetar a integridade do equipamento, devido ao sobreaquecimento do mesmo.

Outro ponto importante a ser analisado a partir dos dados da tabela 1, é que a princípio, utilizar as vazões das posições P4 e P5, só seriam um problema se a água não estivesse sendo reutilizada em um sistema de recirculação. Porém, o PWM trabalha limitando o consumo de energia da bomba, ou seja, nas posições P4 e P5 o consumo de energia elétrica da bomba é maior do que em P3. Assim, mesmo nos sistemas de reuso justifica-se determinar uma vazão ideal tanto para que o equipamento não seja danificado por sobreaquecimento, quanto para a bomba não trabalhar em um regime de consumo de energia acima do necessário.

5.3 EFICIÊNCIA DO FILTRO DE ÁGUA DO SISTEMA

Na Tabela 2, apresentam-se os parâmetros físico-químicos da água coletada em PC1 e PC2. A finalidade dessas análises e dados é verificar se o filtro de carvão ativo e prata coloidal tem uma eficiência satisfatória.

Tabela 2 – Características físico-químicas para controle da eficiência do filtro

Parâmetro	1ª coleta		2ª coleta		3ª coleta		4ª coleta		5ª coleta		6ª coleta		Portaria GM/MS Nº 888
	PC1	PC2											
Condutividade ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	204,3	201,7	215,1	214,1	197,3	231,9	213,5	273,1	184,5	294,1	193,7	307,4	-
pH	8,26	8,29	8,28	8,37	8,40	8,65	8,35	8,84	8,39	9,19	8,36	9,81	6,0 a 9,5
Cloro livre (mg/L)	0,354	0,310	0,352	0,305	0,359	0,297	0,359	0,298	0,354	0,300	0,355	0,298	0,2 a 2,0
¹ STD (mg/L)	93,2	69,8	91,7	68,7	54,9	75,4	87,1	83,1	63,9	79,0	58,9	81,2	1000 mg/L
Bactérias heterotróficas	ausên cia	-	prese nça	-	-								

¹Sólidos Totais Dissolvidos; análise não realizada.

Fonte: Autor (2023)

Pode-se observar na Tabela 2 que o filtro reteve parcialmente o cloro livre, deixando passar para os reservatórios um teor que se mantém próximo ao mínimo exigido pela legislação. Essa redução da concentração do cloro é importante para a preservação dos trocadores, pois os mesmos são fabricados em alumínio e podem sofrer corrosão em níveis elevados da concentração de cloro. Já os sólidos totais dissolvidos (STD), conforme os dados da Tabela 2, tiveram uma redução apenas nas três primeiras coletas, porém apesar de nas demais coletas o valor ter aumentado na água dos reservatórios, isso não significa que o filtro não reteve os sólidos, ou seja, o aumento dos STD pode estar relacionado a entrada de material particulado devido a falhas na vedação dos reservatórios e/ou devido à atividade microbiológica, referente a presença de bactérias heterotróficas na água de reuso.

A hipótese de falha na vedação e atividade microbiana é corroborada pelos dados de pH e condutividade, também apresentados na Tabela 2. A entrada de materiais particulados e a excreção dos microrganismos devido a suas atividades metabólicas, podem ser associados ao aumento da condutividade elétrica e do pH da água dos reservatórios, como observado por Souza e Santos (2019).

Portanto o desempenho do filtro foi satisfatório uma vez que reduziu parcialmente o cloro e materiais particulados. Assim, sugere-se como trabalho futuro melhorias na vedação dos

reservatórios e um estudo da vida útil do filtro, pois o fabricante estima uma vida útil do mesmo de 6 meses ou 3000 litros e, no momento, não houve tempo nem volume filtrado de água para realizar o referido estudo.

5.4 QUALIDADE DA ÁGUA NOS RESERVATÓRIOS DO SISTEMA

Na Tabela 3, apresentam-se os parâmetros físico-químicos e microbiológico monitorados da água nos reservatórios do sistema de reuso, bem como os parâmetros estabelecidos pelo MS. A finalidade dessas análises e dados foi verificar a vida útil da água que recircula no sistema de reuso.

Dos parâmetros analisados, dois não apresentaram variações significativas, sendo estes a dureza total e os sólidos totais dissolvidos. Um aumento em ambos os parâmetros poderia resultar em incrustações nas tubulações, bombas e resistência de aquecimento, ocasionando a obstrução e danos a estes componentes. Porém, como se observa na tabela 3, ambos os parâmetros se mantiveram muito abaixo do nível máximo permitido.

Tabela 3 – Características físico-químicas e microbiológica da água do sistema de reuso

Parâmetro	1ª coleta	2ª coleta	3ª coleta	4ª coleta	5ª coleta	6ª coleta	Portaria GM/MS Nº 888
¹ pH	8,29	8,37	8,65	8,84	9,19	9,81	6,0 a 9,5
Condutividade (μ S/cm)	201,7	214,1	231,9	273,1	294,1	307,4	-
Dureza total (mg/L)	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	500 mg/L
Cloro livre (mg/L)	0,310	0,305	0,297	0,298	0,300	0,298	0,2 a 2,0
² STD (mg/L)	69,8	68,7	75,4	83,1	79,0	81,2	1000 mg/L
Bactérias heterotróficas	ausência	presença	presença	presença	presença	presença	-

¹potencial hidrogeniônico; ²Sólidos Totais Dissolvidos; ³análise não realizada.

Fonte: Autor (2023)

O cloro livre, conforme observado na Tabela 3, manteve-se dentro da faixa estabelecida pela portaria nº 888 do MS em todas as coletas. Porém, mesmo o cloro, que é um agente antimicrobiano, mantendo-se acima do nível mínimo, a partir da 2ª coleta detectou-se a presença de bactérias heterotróficas. Essas bactérias, de acordo com Brasil (2006), podem provocar alterações físicas e químicas da água em função de suas atividades metabólicas, como a alteração que ocorreu no pH das amostras. Ou seja, a atividade microbiana pode explicar a elevação do pH 8,29 na primeira coleta, até o pH 9,81 da última coleta. O aumento no pH propicia mais íons livres

na água e, conseqüentemente um aumento na condutividade elétrica, claramente observado na tabela 3.

Como a água reutilizada apresentou, na sexta coleta, um pH maior do que o valor estipulado pela portaria nº888 do MS (BRASIL, 2021), determinou-se o fim da vida útil da mesma. Existem tratamentos químicos ou equipamentos como membranas, que poderiam ser utilizados para recuperar ou prolongar a vida útil da água de reuso. Porém, optou-se por uma medida mais simples e de baixo custo, a disponibilização dos 200 litros de água para a equipe de limpeza realizar a lavagem dos pisos na área externa do bloco de laboratórios de ensino da UNILA.

5.5 RECUPERAÇÃO DO CALOR RESIDUAL DO EFLUENTE

Para estimar a quantidade de calor que pode ser recuperado e quantos trocadores de calor são necessários para realizar o mesmo, iniciou-se com a medição da vazão volumétrica (Q_v), considerada constante, produzida pela bomba 1 (B1). As medições e cálculos indicaram uma Q_v de 0,1597 m³/h, ou seja, aproximadamente 0,16 m³/h. Como a vazão não varia, uma vez que a bomba centrífuga propicia um controle preciso da mesma, pode-se calcular a vazão mássica (Q_m) (equação 14) e conseqüentemente a massa de água (equação 15) que passa por hora nos trocadores de calor. Cabe ressaltar, que os cálculos foram realizados utilizando-se o valor tabelado da massa específica da água (ρ) para a temperatura de 42 °C, conforme disponibilizado na literatura por Incropera e Witt (2003) e, chegou-se a uma Q_m de 158,3 kg/h.

Com o valor de Q_m foi possível calcular a quantidade de calor (ΔQ) que pode ser recuperada por hora de funcionamento do destilador (equação 12). Cabe enfatizar que o ΔT foi determinado pela diferença entre a temperatura do efluente que entra no bloco de trocadores e a temperatura média ambiente, que são 43,2 °C e 20,2 °C, respectivamente. Portanto, o arrefecimento do efluente possibilita a recuperação de 15.509 kW/h de calor residual.

Para estimar quantos trocadores de calor Peltier são necessários para recuperar esse calor residual, determinou-se a capacidade de transferência de calor de um bloco com oito trocadores. De acordo com Incropera e Witt (2003), desprezando-se as perdas laterais do trocador de calor devido à reduzida espessura em relação a superfície do trocador, determinou-se que o bloco possui a capacidade de recuperar 940,8 W/h. Assim, a estimativa foi de aproximadamente 16 blocos de trocadores de calor para recuperar a energia térmica residual do efluente e viabilizá-lo para reuso no destilador.

Cabe observar que os cálculos foram realizados seguindo simplificações sugeridas por Incropera e Witt (2003). Portanto, fica como sugestão para trabalhos futuros, um estudo

aprofundado do desempenho dos blocos de trocadores de calor através dos métodos sugeridos por esses autores, da média logarítmica da diferença de temperatura (MLTD) ou do fator de efetividade (NUT). Em resumo, estes métodos, segundo Incropera e Witt (2003)., abordam a razão entre a taxa de transferência de calor e a taxa máxima possível e, podem corroborar com os resultados apresentados neste trabalho.

Outro ponto relevante verificado foi a porcentagem total de calor que pode ser recuperado. Para esse cálculo, determinou-se a quantidade de energia térmica produzida pelo equipamento. Como a resistência elétrica do destilador se encontra submersa na água, no interior do ebulidor E1 (Figura 19), pode-se considerar que toda a potência elétrica é dissipada para a água na forma de calor. Portanto, calculou-se que o destilador utilizado nessa pesquisa produz 25.200 kW/h de calor. Assim, com um bloco de trocadores de calor foi possível recuperar 3,73% do calor residual. Ou seja, se implantados os 16 trocadores que se estimou serem necessários, pode-se chegar a 59,73% de energia térmica residual recuperada.

Na Tabela 4, apresenta-se um resumo dos resultados obtidos na parte experimental desse trabalho.

Tabela 4 – Resultados experimentais obtidos

Vazão volumétrica (Q_v)	0,1597 m ³ /h
Vazão mássica (Q_m)	158,3 kg/h
Calor residual do efluente (Q_{res})	15.509 kW/h
Quantidade de calor produzida pelo destilador (Q_{prod})	25.200 kW/h
Calor residual recuperado por bloco de trocadores de calor (Q_{rec})	940,8 W/h
Estimativa da quantidade de blocos de trocadores de calor necessários para recupera todo o calor residual	16 blocos
Estimativa da quantidade de calor a ser recuperado ($Q_{rec\ total}$)	59,73%

Fonte: Autor (2023)

Na prática, conforme Lage (2020), é esperado um rendimento em máquinas térmicas abaixo do máximo permitido pela Termodinâmica, pois são inevitáveis fugas de calor em trocas térmicas com as paredes do equipamento ou na realização do trabalho. Portanto, uma recuperação de energia térmica em torno de 60% é uma taxa relevante considerando que algumas perdas são inevitáveis.

5.6 COGERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

A análise do desempenho das pastilhas Seebeck iniciou com testes que compararam o desempenho teórico em relação ao desempenho real, cujos resultados encontram-se na Tabela 5. Observou-se nesses resultados obtidos que o desempenho teórico fornecido pelo fabricante está acima dos resultados obtidos em condições reais de trabalho. Mesmo quando se utilizou gelo a $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, forçando a transferência de calor na superfície fria, não se obteve em todos os gradientes de temperatura resultados similares aos fornecidos pelo fabricante. Ou seja, com um gradiente de $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ a produção de eletricidade foi similar a teórica, mas com o aumento do gradiente de temperatura notou-se uma queda na produção em relação a produção teórica que culminou em uma redução de 14,6% no gradiente de $100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Destaca-se que em condições reais, onde a superfície fria da célula Seebeck sofre a transferência de forma natural com o ambiente, a produção de eletricidade manteve-se abaixo da produção teórica em todos os gradientes de temperatura. Cabe enfatizar que para o gradiente de $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, nas condições reais, o teste não pôde ser realizado, visto que tal gradiente de temperatura não foi alcançado, pois a temperatura ambiente encontrava-se em torno dos $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ e o ponto de ebulição da água, nas condições normais de temperatura e pressão (CNTP), é de $100\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Tabela 5 – Cogeração de eletricidade em vários gradientes de temperatura

ORIGEM DOS DADOS	GRANDEZA FÍSICA	GRADIENTES DE TEMPERATURA EM $^{\circ}\text{C}$				
		20	40	60	80	100
Dados fornecidos pelo fabricante	Tensão (V)	0,97	1,80	2,40	3,60	4,80
	Corrente (mA)	225	368	469	558	669
Teste com gelo $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$	Tensão (V)	0,98	1,80	2,38	3,55	4,1
	Corrente (mA)	227	370	465	449	568
Teste em condições reais	Tensão (V)	0,89	1,70	2,26	3,41	-
	Corrente (mA)	219	361	455	439	-

Fonte: Autor (2023)

Após constatar que em condições reais o desempenho está abaixo do estipulado pelo fabricante, realizou-se testes com as pastilhas Seebeck conectadas eletricamente em série, cuja finalidade foi verificar se ocorre um aumento na produção de eletricidade. Na Tabela 6, encontram-se os resultados obtidos para as configurações de ligação elétrica em série de duas, três e quatro pastilhas Seebeck, além da produção individual de uma pastilha. Cabe enfatizar que esses resultados foram obtidos nas condições reais de trabalho, onde a temperatura ambiente do laboratório

manteve-se em torno de 20,2 °C e o efluente que fornece o calor residual na temperatura de 43,2 °C, propiciando, portanto, um gradiente de 23,0 °C.

Tabela 6 – Cogeração de eletricidade com pastilhas conectadas em série

Quantidade de pastilhas em série	Grandeza Física	Esperado	Medição
1	Tensão (V)	0,95	0,95
	Corrente (mA)	234	234
2	Tensão (V)	1,9	1,27
	Corrente (mA)	468	311
3	Tensão (V)	2,85	1,31
	Corrente (mA)	702	318
4	Tensão (V)	3,8	1,33
	Corrente (mA)	936	321

Fonte: Autor (2023)

A princípio esperava-se que a cada pastilha adicionada eletricamente em série houvesse um aumento de 1,0 V na diferença de potencial, porém conforme se observa na Tabela 6, não houve um aumento significativo na produção de eletricidade com a conexão em série das pastilhas. Ao contrário do esperado, a conexão de 4 pastilhas em série propiciou apenas um acréscimo de 0,38 V. Assim, com base nos resultados obtidos optou-se por montar todas as pastilhas Seebeck eletricamente em paralelo, cuja configuração de montagem propiciou obter-se uma produção média de aproximadamente 1,0 V.

Para suprir a demanda elétrica dos componentes no circuito projetado na Figura 20, considerando a proporcionalidade da corrente elétrica na elevação de 1,0 Vcc para 12 Vcc realizada pelo CRET, calculou-se ser necessário no mínimo 128 pastilhas Seebeck conectadas em paralelo.

Outro ponto avaliado no sistema proposto foi o rendimento das pastilhas Seebeck. Conforme Américo et al. (2019) a eficiência da atual geração de pastilhas Seebeck encontra-se em uma faixa entre 11 e 14%, portanto buscou-se algumas informações junto ao fornecedor das pastilhas para a realização dos cálculos de rendimento. Cabe enfatizar que o fabricante das células Seebeck utilizadas nesse trabalho não disponibiliza o datasheet das mesmas e, foram concedidas algumas informações com a prerrogativa de não ser divulgado a marca e o modelo das mesmas. De acordo com as informações fornecidas, a condutividade elétrica (σ) é $2,11 \cdot 10^4$ 1/ Ω m e a condutividade térmica (k) é 1,8 W/mK.

Com o auxílio da equação 5 calculou-se o coeficiente Seebeck (α) do regime real

de trabalho, cujo valor calculado foi 43,478 mV/K. Assim, com o auxílio das equações 3 e 4, calculou-se que as pastilhas estudadas nesse trabalho possuem um rendimento (η) de 6,7%. Comparando com o η citado por Américo et al. (2019), fica evidente que as pastilhas utilizadas nesse trabalho possuem uma eficiência muito baixa, ou seja, não pertencem a última geração de pastilhas Seebeck desenvolvidas.

5.7 VIABILIDADE ECONÔMICA DO SISTEMA

A análise da viabilidade econômica foi realizada em três etapas, sendo que a primeira etapa analisou apenas o sistema de reuso de água, a segunda etapa analisou o sistema de cogeração e a terceira etapa analisou todo o sistema de reuso e cogeração de eletricidade.

Optou-se por essa análise parcial, em um primeiro momento, para demonstrar aos interessados em implantar o sistema proposto, se tanto o reuso da água quanto a cogeração de eletricidade, são viáveis por si só e, que nenhuma delas gera déficit, necessitando do amparo financeiro ocasionado pelo lucro da outra. Ou seja, a análise parcial pode corroborar que tanto o reuso da água quanto a cogeração de eletricidade, podem gerar individualmente benefícios ambientais e econômicos

5.7.1 Viabilidade do Sistema de Reuso de Água

Como a UNILA se encontra no Estado do Paraná, para realizar os cálculos de viabilidade econômica, foi utilizado o valor do m³ de água determinado pela Agência Reguladora do Paraná (AGEPAR).

Devido a UNILA ser uma Autarquia Pública vinculada ao Ministério da Educação (MEC), a tarifa utilizada é a mensal da categoria Comercial/Utilidade Pública/Poder Público do anexo I da Resolução nº 9/2022 da AGEPAR. O valor determinado, de acordo com a tarifa consultada, é de \$16,29 dólares para até 5 m³ consumidos em um período de 30 dias. Cabe enfatizar que o valor apresentado em dólar americano, foi convertido do real utilizando o câmbio de 10/11/2023.

Para os cálculos, utilizou-se o valor baseando-se apenas nessa tarifa mínima de consumo de 5 m³, sem as taxas adicionais que são cobradas quando esse valor mínimo é excedido. Assim, o valor médio de 1 m³ é de \$3,25 dólares.

Durante um período de 36 dias, antes do fim da vida útil da água do sistema de reuso, produziram-se 141,9 litros de água destilada. Sabe-se que é necessário descartar 22,2 litros de água para produzir 1 litro de água destilada. Portanto 141,9 litros de água destilada demandam a

produção de 3150 litros de efluente. Assim, o valor economizado, visto que se evitou descartar 3,15 m³ de água, é de \$10,23 dólares. Como o projeto teve um custo de \$124,07 dólares, seriam necessários 12 ciclos de vida útil da água reutilizada, aproximadamente 14,5 meses, para que o investimento seja igualado ao valor economizado.

Assim, em 15 meses o investimento realizado para economizar água passa a gerar lucros. Comparado com outros segmentos de investimentos em economia de recursos e energia, o projeto apresenta um retorno rápido. Por exemplo, conforme Ferreira e Furtado (2023) o segmento de recuperação de energia térmica residual para cogeração de energia, tem em média um retorno depois de 5 anos. Ou seja, esse comparativo demonstra que o segmento de economia de recursos hídricos tem um retorno 4 vezes mais rápido que o segmento apresentado pelos autores.

Portanto, devido à economicidade de água, diminuição da produção de efluentes e o rápido retorno financeiro do investimento, pode-se afirmar que o sistema proposto para reutilizar água no destilador Pilsen é sustentável. Corroboram com essa afirmação Camioto e Rebelatto (2014), pois segundo os autores um sistema que não é poluente, prioriza a conservação energética e os recursos naturais e é economicamente viável, é um sistema sustentável.

5.7.2 Viabilidade do Sistema de Cogeração de Eletricidade

Utilizando a taxa de conversão do real para o dólar do câmbio oficial segundo o Banco Central (BC) do Brasil, na data de 10/11/2023, calculou-se o investimento necessário em dólares. Ou seja, foram adquiridas 12 pastilhas com um custo por unidade de \$1,58 dólares, portanto, a implantação do quantitativo necessário de 128 pastilhas estimadas para atender a demanda do circuito elétrico, requer um investimento de \$202,24 dólares.

Para o cálculo do retorno financeiro do investimento necessário, utilizou-se a tarifa da bandeira amarela determinada pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEL) para o ano de 2023. De acordo com a referida agência governamental, a tarifa é de \$0,61 dólar para cada 100 quilowatts-hora (kWh) consumidos no mês. Portanto, como as 128 pastilhas Seebeck podem produzir 100,6 kWh e, considerando uma média de funcionamento do sistema de 4 horas diárias, em 30 dias pode-se produzir 12068 kWh, ou seja, a perspectiva é de uma economia de \$73,61 dólares de energia elétrica por mês com a cogeração elétrica.

Visto que as pastilhas Seebeck e demais materiais elétricos do sistema, que compõem apenas a cogeração de eletricidade, requerem um investimento total de \$359,56 dólares, em apenas 4,9 meses esse investimento é recuperado, ou seja, a partir do quinto mês o investimento passa a gerar retorno financeiro. Esse é um retorno muito rápido, pois conforme Ferreira e Furtado

(2023), investimentos na cogeração de eletricidade podem levar até 5 anos para gerarem retorno financeiro.

Portanto, apesar do baixo rendimento de conversão de energia térmica em energia elétrica, que o estudo de desempenho de produção de energia elétrica das pastilhas apresentou, a análise de viabilidade econômica demonstra que a aplicação das pastilhas nesse caso estudado, ainda assim é viável, pois há retorno econômico em menos de seis meses.

5.7.3 Viabilidade do Sistema completo de Reuso de Água e Cogeração de Eletricidade

Como a cada 36 dias economizam-se \$10,23 dólares reutilizando a água, em 30 dias há uma economia de \$8,52 dólares. Portanto, somando a economia gerada pelo reuso da água em 30 dias com uma economia de \$73,61 dólares de energia elétrica por mês com a cogeração elétrica, têm-se um total de \$82,13 dólares economizados mensalmente.

Como o sistema de reuso de água e cogeração elétrica, se implantado com o total estimado de pastilhas, tem um investimento previsto de \$432,35 dólares, em apenas 5,3 meses há o retorno de todo o investimento realizado, ou seja, em seis meses o sistema proposto estará pago e passa a gerar retorno financeiro.

Portanto, assim como as análises parciais de viabilidade econômica o sistema como um todo demonstra ser viável de ser implantado e pode ser considerado um sistema sustentável de acordo com a definição de sustentabilidade segundo Camioto e Rebelatto (2014). Cabe enfatizar que comparado a investimentos similares, relatados por Ferreira e Furtado (2023), que podem chegar a cinco anos para propiciarem retornos, o sistema completo apresentou uma perspectiva de retorno aproximadamente onze vezes mais rápido, ou seja, trata-se de um investimento com retorno a curto prazo.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Devido a distribuição heterogênea da água no planeta Terra e o agravamento da escassez ocasionada pelas ações antrópicas, é necessário que sejam tomadas medidas mitigadoras para que esse cenário comece a mudar. Diante dessa conjuntura, ações como o reuso de águas residuais podem contribuir para a diminuição de desperdícios e o uso mais eficiente e sustentável dos recursos hídricos. Assim, o sistema desenvolvido de reuso da água em destiladores Pilsen se mostrou promissor, pois pode contribuir na diminuição do volume de água captada, tratada e consumida na Universidade, bem como na diminuição da produção de efluentes.

Já o atual consumo elevado de combustíveis fósseis e emissões de gases poluentes e, o inevitável agravamento dos impactos ambientais ocasionados pelos mesmos, também requerem que sejam tomadas medidas urgentes para que esse cenário também comece a mudar. Para tal, ações como a recuperação de calor residual podem contribuir para a diminuição de desperdícios e o uso mais eficiente e sustentável dos recursos energéticos. Assim, o estudo realizado da recuperação de calor residual no efluente de destiladores Pilsen se mostrou promissor, pois contribui na diminuição das perdas térmicas, uma vez que possibilita recuperar aproximadamente 60% do calor produzido pelo equipamento e disponibilizá-lo para a cogeração de eletricidade.

A análise de viabilidade econômica do sistema demonstrou ser viável a implantação do mesmo, pois normalmente investimentos similares chegam a cinco anos para propiciarem retornos, já o sistema desenvolvido nesse trabalho apresentou uma perspectiva de retorno em aproximadamente 5,3 meses, ou seja, onze vezes mais rápido. Portanto, a partir do sexto mês, o sistema passa a gerar um ganho mensal de \$82,13 dólares, propiciados pelo reuso da água e a eletricidade cogerada.

Em contrapartida, o sistema de cogeração elétrica estudado, apesar de ser viável economicamente, mostrou baixa eficiência das pastilhas Seebeck em relação aos resultados esperados, portanto pode-se afirmar que investimentos no desenvolvimento e melhoria da eficiência de pastilhas Seebeck são desejáveis e propícios. Porém, cabe enfatizar que o baixo rendimento de 6,7% obtido, não retira o mérito do sistema de cogeração proposto, pois a recuperação da energia térmica que seria descartada no ambiente já é um benefício interessante ao meio ambiente. Ou seja, por utilizar apenas o calor residual gerado na destilação da água, não apresentando resíduos durante o processo, o sistema de cogeração proposto pode ser considerado uma forma de energia limpa e contribuir para a diminuição do consumo de energia elétrica no processo de destilação estudado.

Portanto, conclui-se que o sistema implantado é sustentável, pois se caracteriza como um sistema não poluente, que prioriza a conservação de recursos hídricos sem deixar de ser

economicamente viável. Ainda propicia, tanto a curto e a longo prazo, resultados de eficiência e economicidade tanto para a instituição quanto para a sociedade. Assim, sugere-se que o sistema desenvolvido seja replicado nos 8 destiladores Pilsen que a Universidade possui em seus laboratórios de ensino e pesquisa.

Sugere-se para trabalhos futuros a busca de outras pastilhas disponíveis no mercado que possam ser adquiridas e testadas no sistema que foi estudado neste trabalho, pois o mesmo foi projetado na forma de bancada justamente para auxiliar em estudos futuros de cogeração de eletricidade. Além da busca por outras opções de pastilhas, pode-se desenvolver novos trocadores de calor, testando formas e materiais utilizados na fabricação dos mesmos, assim como a pesquisa de aditivos ou novos líquidos que possam substituir a água na transferência de calor ou melhorar a taxa de transferência da mesma.

REFERÊNCIAS

- AMÉRICO, R. et al. Estudos preliminares de materiais termoelétricos para obtenção de energia elétrica a partir do calor residual. **Revista Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração**, São Paulo, v. 16, n. 1, p. 8-14, jan./mar. 2019.
- ANDRADE, A. L. C.; MATTEI, L. A (in)sustentabilidade da matriz energética brasileira. **Revista Brasileira de Energia**, Itajubá, v. 19, n. 2, p. 9–36, 2º sem. 2013.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA. **Guia Nacional de Coleta e Preservação de Amostras: água, sedimento, comunidades aquáticas e efluentes líquidos**. Brasília, 2011.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA. **Manual de conservação e reúso de água na agroindústria sucroenergética**. Brasília, 2009.
- AUGUSTO, L. G. S. et al. O contexto global e nacional frente aos desafios do acesso adequado à água para consumo humano. **Ciência & Saúde Coletiva**, Rio de Janeiro, v. 17, n. 6, p. 1511–1522, jun. 2012.
- BARROS, E. V. A matriz energética mundial e a competitividade das nações: bases de uma nova geopolítica. **Revista ENGEVISTA**, Niterói, v. 9, n. 1, p. 47–56, junho 2007.
- BERGMAN, T. L. et al. **Fundamentos de transferência de calor e de massa**. 7ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014.
- BRASIL. Ministério da Saúde. Gabinete do Ministro. **Portaria nº2.914, de 12 de dezembro de 2011**. Brasília, 2011.
- BRASIL. Ministério da Saúde. Gabinete do Ministro. **Portaria nº 888, de 04 de maio de 2021**. Brasília, 2021.
- BRASIL. Ministério da Saúde. Secretaria de Vigilância em Saúde. **Vigilância e controle da qualidade da água para consumo humano**. Brasília, 2006.
- BONDARIK, R. et al. Uma visão geral sobre o potencial de geração de energias renováveis no Brasil. **Interciência Revista de Ciência e Tecnologia das Américas**, Venezuela, v. 43, n. 10, p. 680-688, out. 2018.
- BORBA, N. Z.; BAYER, D. A. A água como bem jurídico econômico. **Temiminós Revista Científica**, Rio de Janeiro, vol. 5, nº 1, p. 96–110, 2015.
- CAMIOTO, F. C.; REBELATTO, D. A. N. Análise da contribuição ambiental por meio da alteração da matriz energética do setor brasileiro de ferro-gusa e aço. **Gestão & Produção**, São Carlos, v. 21, n. 4, p. 732–744, 2014.
- CARVALHO, C. B. et al. Sintonia de Controladores em Trocadores de Calor sob a Influência de Incrustações. In: II SMNE – SIMPÓSIO DE MÉTODOS NUMÉRICOS EM ENGENHARIA, Universidade Federal do Paraná, 25 a 27 de outubro. **Anais...** Curitiba, PR: ResearchGate, 2017. p. 1–5.

- CARVALHO, J. F. Energia e Sociedade. **Revista Estudos Avançados**, São Paulo, v. 28, n. 80, p. 1–16, jan./abr. 2014.
- ÇENGEL, Y. A.; CIMBALA, M. A. **Mecânica dos fluidos Fundamentos e aplicações**. 3ª ed. São Paulo: AMGH, 2015.
- COSTA, R. C. et al. Avaliação da Resistência a Corrosão de Revestimentos Metálicos Depositados por Aspersão Térmica a Arco: uma Aplicação em Trocadores de Calor. **Soldag. Insp.**, São Paulo, v. 19, n. 04, p. 292–301, out./dez. 2014.
- DINIZ, Á. et al. Estudo do efeito corrosivo dos aços inox AISI 304 e microligado Hardox 600 em meios salino e ácido. **Revista Eletrônica Engenharia de Interesse Social**. João Monlevade, v. 1, n. 1, p. 1–9, 2016.
- DUPONT, F. H. et al. Energias Renováveis: buscando por uma matriz energética sustentável. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**. Santa Maria, v. 19, n. 1, Ed. Especial, p. 70–81, jan./abr. 2015.
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. **Matriz Energética e Elétrica**, 2023. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>. Acesso em: 06 maio 2023.
- FARIAS, L. M., SELITTO, M. A.. Uso da energia ao longo da história: evolução e perspectivas futuras. **Revista Liberato**, Novo Hamburgo, v. 12, n. 17, p. 01–106, jan./jun. 2011.
- FERREIRA, W.; FURTADO, A. C. Recuperação e reuso de energia térmica em plantas industriais: uma revisão sistemática da literatura. **Revista Orbis Latina**, Foz do Iguaçu, v. 13, n. 2, p. 136–149, 2023.
- FUNDAÇÃO NACIONAL DE SAÚDE – FUNASA. **Manual de Cloração de Água em Pequenas Comunidades Utilizando o Clorador Simplificado Desenvolvido pela Funasa**. Brasília, 2014.
- FUNDAÇÃO NACIONAL DE SAÚDE – FUNASA. **Manual Prático de Análise de Água**. Brasília, 2004.
- FUNDAÇÃO NACIONAL DE SAÚDE – FUNASA. **Manual Prático de Análise de Água**. Brasília, 2013.
- GOLDEMBERG, J. Energia e Sustentabilidade. **Revista Cultura e Extensão**, São Paulo, n. 14, p.33–43, nov. 2015.
- GOLDEMBERG, J.; LUCON, O. Energia e Meio Ambiente no Brasil. **Revista Estudos Avançados**, São Paulo, v. 21, n. 59, p. 1–14, jan./abr. 2007.
- GOLDEMBERG, J. Pesquisa e desenvolvimento na área de energia. **Revista São Paulo em Perspectiva**, São Paulo, v. 14, n. 3, p. 91–97, jul. 2000.
- GUMERATO, H. F., et al. Transferência de calor transiente na agitação linear intermitente de latas. **Revista Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v. 27, n.3, p. 649–657, jul./set. 2007.

HALLIDAY et al. **Fundamentos de Física, volume 1: mecânica**. 10ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

HALLIDAY et al. **Fundamentos de Física, volume 2: Gravitação Ondas e Termodinâmica**. 10ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

HALLIDAY et al. **Fundamentos de Física, volume 4: óptica e física moderna**. 10ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

HASSAN, A. et al. Monetization of the environmental damage caused by fossil fuels. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 28, p. 21204–21211, 2021.

HENDRICKS, Terry; CHOATE, Willian T. **Engineering Scoping Study of Thermoelectric Generator Systems for Industrial Waste Heat Recovery**. 2006. 74 f. Department of Energy, Industrial Technologies Program, U.S.A, 2006.

INCROPERA, F. P; WITT, D. P. **Fundamentals of heat and mass transfer**. 5ª ed. New York: John Wiley & Sons, 2003.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY - IEA. **Energy Statistics Data Browser**. Finland: International Energy Agency, 2022. Disponível em: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/energy-statistics-data-browser?country=WORLD&fuel=Energy%20supply&indicator=TESbySource>. Acesso em: 07 maio 2023.

JANNA, William s. **Projetos de Sistemas Fluidotérmicos**. 4ª ed. São Paulo: CENGAGE Learning, 2017.

JÚNIOR, D. S. C. et al. Análise da oferta interna das fontes de energia primária e secundária no Brasil entre 1990 a 2010. In: VIII SBPGCF – SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS, Universidade Federal Rural de Pernambuco, 22 a 24 de outubro. **Anais...** Recife, PE: ResearchGate, 2014. p. 628–632.

LAGE, E. Ciclos termodinâmicos e rendimentos de máquinas térmicas. **Revista Ciência Elementar**, Porto, v. 8, n. 01, p. 151–155, mar. 2020.

LEGNER, C. A importância do tratamento de água da torre de resfriamento. **Revista TAE especializada em tratamento de água & efluentes**. Santo André, ano 12, n. 71, fev/mar de 2023. Disponível em: <https://www.revistatae.com.br/Artigo/821/a-importancia-do-tratamento-de-agua-da-torre-de-resfriamento>. Acesso em: 05 setembro 2023.

LEITE, V. P. et al. Emissões de gases de efeito estufa no estado de São Paulo: análise do setor de transportes e impactos na saúde. **Vittalle – Revista de Ciências da Saúde**, Diadema, v. 32, n. 3, p. 143–153, nov. 2020.

MACETI, H. et al. Ciência e cotidiano: A Física do chuveiro elétrico. **Scientia Plena**, São Cristóvão, n. 3, v. 8, p. 313–318, dez. 2007.

MARAN, A. L. O.; JUNIOR, O. H. A. Estudo e análise computacional multifísica do efeito termoelétrico aplicado a microgeradores (energy harvesting). In: V SICT Sul – Simpósio de Integração Científica e Tecnológica do Sul Catarinense, Instituto Federal de Santa Catarina, 19 e 20

de outubro. **Anais...** Araranguá, SC: IFSC, 2016 p. 684–691.

MARQUES, M. S.; PEDRO, M, A. M. Estudo de tratamentos de água utilizados nas indústrias farmacêuticas e de cosméticos. **Revista Científica UNILAGO**, São José do Rio Preto, v. 1, n. 1, p. 1–15, 2021.

MARQUINI, M. F. et al. Simulação e análise de um sistema industrial de colunas de destilação de etanol. **Acta Scientiarum Technology**, Maringá, vol. 29, n° 1, p. 23–28, 2007.

MATIAS, W. G. **Determinação sólidos**. 2019. Disponível em: <https://limaens.paginas.ufsc.br/files/2019/01/S%C3%B3lidos.pdf>. Acesso em: 10 setembro 2023.

MERCADO LIVRE. Dissipador De Calor 40x40x12mm Pastilha Peltier Cpu Diy Água. 2023. Disponível em: https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-1405626637-dissipador-de-calor-40x40x12mm-pastilha-peltier-cpu-diy-agua-_JM?matt_tool=18956390&utm_source=google_shopping&utm_medium=organic. Acesso: 13 janeiro 2023.

MTB CIENTÍFICA, Manual de Instruções Destilador Pilsen SDEST 10L. Piracicaba, 2021, 10 pg.

MEYER, S. T. O Uso de Cloro na Desinfecção de Águas, a Formação de Trihalometanos e os Riscos Potenciais à Saúde Pública. **Cadernos de Saúde Pública**, Rio de Janeiro, v. 10, n. 1, p. 99–110, jan./mar. 1994.

MOREIRA, M. R. et al. O Brasil rumo a 2030? Percepções de especialistas brasileiros(as) em saúde sobre o potencial de o País cumprir os ODS Brazil heading to 2030. **Saúde Debate**, Rio de Janeiro, v. 43, n. Especial 7, p. 22–35, 2019.

NASCIMENTO, R. S.; ALVES, G. M. Fontes alternativas e renováveis de energia no brasil: métodos e benefícios ambientais. In: XVI EPG - Encontro Latino Americano de Pós-Graduação, Universidade Do Vale do Paraíba, 27 e 28 de outubro. **Anais...** São José dos Campos, SP: UNIVAP, 2016. p. 1–6.

NAGAOKA, M. P. T. et al. Análise de viabilidade econômica em Co-geração de energia elétrica. **Revista Científica Eletrônica De Engenharia Florestal**, Garça, v. 5, n. 9, p. 1–15, fev. 2007.

NUNES, H. J. L.; BARBOSA, A. T. R. Efeito seebeck no aumento de eficiência de uma caldeira. In: XIII CIBEM - Congresso Ibero-americano de Engenharia Mecânica, Lisboa, 23 a 26 de outubro. **Anais...** Lisboa, PT: ResearchGate, 2017. p. 1–9.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS – ONU. **Os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável no Brasil**. Brasília: Nações Unidas no Brasil, 2023. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>. Acesso em: 12 maio 2023.

PARRON, L. M. et al. **Manual de procedimentos de amostragem e análise físico-química de água**. 1ª ed. Colombo: EMBRAPA, 2011.

PERIS, B. et al. Experimental study of an ORC (organic Rankine cycle) for low grade waste heat recovery in a ceramic industry. **Energy**, v. 85, n. C, p. 534–542, jun. 2015.

- PILON, A. et al. Sistema de Cogeração de Energia. **Revista Técnico Científica do IFSC**, Araranguá, v. 3, n. 1, p. 474–482, out. 2012.
- RESTREPO, R. M. et al.. Analysis of potential waste heat recovery from a stenter in a textile plant. **Revista DYNA**, Medellín, v. 88, n. 217, p. 292–302, abr./jun. 2021.
- RODRIGUES, C. G. Mobilidade eletrônica e viabilidade do 4H-SiC para a indústria de semicondutores. **Brazilian Journal of Technology**, Curitiba, v.4, n.3, p 110-119 jul./sep. 2021
- RODRÍGUEZ, J. E. La recuperación termoeléctrica del calor residual, una fuente de energía ambientalmente amigable. **Momento Revista de Física**, Bogotá, v. 1, n. 41, p. 1–23, dez. 2010.
- RONDON, H. A. et al. Implantação de um sistema de reuso da água residual do aparelho destilador para laboratório de solos do IFMT. In: V EEEA - Encontro em Engenharia de Edificações e Ambiental, Universidade Federal do Mato Grosso, 21 e 22 de novembro. **Anais...** Cuiabá, MT: ResearchGate, 2017. p. 1–15.
- SANTOS, L. J. R. et al. Viabilidade de utilização de uma pastilha Peltier para recuperação de energia na pastilha de freio do protótipo de um veículo utilizado em competição baja sae. **Revista de Tecnologias**, Ourinhos, v. 10, n. 2, p. 52–68, jan./jun. 2017.
- SANTOS, R.F.M.; SPINELLI, J.E. Análise da geração de energia elétrica por meio da utilização de conversores do tipo TEG em lingotamento contínuo de aços. **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, v. 24, n. 3, 2019.
- SCUOTTO, S. **Trocadores De Calor Cerâmicos Para Aplicações Em Altas Temperaturas: uma análise experimental**. 2013. 95 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Centro Universitário da Fundação Educacional Inaciana, São Bernardo do Campo, 2013.
- SILVA, M. J.; KONRATH, R. Dimensionamento de um trocador de calor com a reutilização do ar quente de digestores. **Revista Tecnológica**, Chapecó, v. 9, n. 1, p. 164-185, jan./jun. 2019.
- SIMABUKULO, L. A. N. et al. Energia, Industrialização e Modernidade – História Social. In: PROJETO ELETROMEMÓRIA - HISTÓRIA DA ENERGIA ELÉTRICA NO ESTADO DE SÃO PAULO, Universidade Estadual de São Paulo. **Produções...** São Paulo, SP: fflch, 2006. p 1–34. Disponível em: <https://eletromemoria.fflch.usp.br/sites/eletromemoria.fflch.usp.br/files/03.pdf>. Acesso em: 21 junho 2023.
- SIMÕES, F. A. F. et al. Potencial de reuso das águas de resfriamento de destiladores laboratoriais. **Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais**, Salvador, v. 8, n. 1, p. 180–194, 2020.
- SOLA, A. V. H.; MOTA, C. M. M. Melhoria da eficiência energética em sistemas motrizes industriais. **Production**, São Paulo, v. 25, n. 3, p. 498-509, jul./set. 2015.
- SOUZA, R. R.; SANTOS, M. M. C. Caixa d'água limpa: uma alternativa para garantia de saúde pública. **Revista Saúde e Meio Ambiente**, Três Lagoas, v. 8, n. 1, p. 96-113, jan./jul. 2019.
- SOUZA, V. C. et al. Análise da qualidade da água de chuva armazenada num reservatório em Maceió-AL e suas possíveis utilizações. In: XVIII SBRH – SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 22 a 26 de novembro.

Anais... Campo Grande, MS: ABRHidro, 2009. p. 1–11.

SOUZA, W. A. **Tratamento de Água**. 1ª ed. Natal: Editora CEFET-RN, 2007.

SOUZA, W. N. T. D.; MANZELA, A. A. Otimização de Desempenho de Trocadores de Calor Compactos. **Revista de Engenharia da Faculdade Salesiana**, Macaé, v. 1, n. 1, p. 33-44, jun. 2015.

TOMAZINI, A. S. Fontes alternativas e renováveis de energia no brasil: métodos e benefícios ambientais. **Revista Educação Ambiental em Ação**, v. 20, n. 82, mar./mai. 2023.

TERMIKA. **Economia de Energia em Instalações de Vapor**. 2023. Disponível em: <https://www.termyka.com.br/economia-de-energia-em-instalacoes-de-vapor.html>. Acesso em: 22 maio 2023.

TEWOLDE, M. et al. Thermoelectric Device Fabrication Using Thermal Spray and Laser Micromachining. **Journal of Thermal Spray Technology**, Switzerland, v. 25, n. 3, p. 431–440, fev. 2016.

TRES, N. et al. Sustainability practices adopted by Industrial companies. **Revista de Administração da UFSM**, Santa Maria, v. 14, n. especial, p. 1140–1159, nov. 2021.

TRIBUNAL DE CONTAS EUROPEU – TCE. **Relatório Especial N° 5/2018: Energias renováveis para um desenvolvimento rural sustentável: muitas sinergias possíveis, mas na sua maioria por explorar**. Território Europeu: União Europeia, 2018. Disponível em: https://www.eca.europa.eu/Lists/ECADocuments/SR18_05/SR_Renewable_Energy_PT.pdf. Acesso em: 17 maio 2023.

VIEIRA, D. P.; RIZATKI, J. R. Utilização do efeito seebeck para recuperação de energia em motores de combustão interna. **Revista Vincci**, Criciúma, v. 3, n. 1, p. 224-241, jan./jul. 2018.

VOLPE, P. L. O. O que são termopastilhas, como funcionam e como os químicos podem utilizar esses componentes. **Química Nova**, São Paulo, v. 16, n. 1, p. 49-53, jan./fev. 1993.

WENDLING, M. Semicondutores. Guaratinguetá: Faculdade de Engenharia e Ciências da Universidade Estadual de São Paulo, 2011. Disponível em: <https://www.feg.unesp.br/Home/PaginasPessoais/ProfMarceloWendling/1---semicondutores.pdf>. Acesso em: 25 maio 2023.

WFS. **Linha Carbon Block**. WFS filtros, 2023. Disponível em: http://www.wfsfiltros.com.br/?ot_portfolio=linha-carbon-black. Acesso em: 02 setembro 2023.

APÊNDICE A – PROCEDIMENTO OPERACIONAL PADRÃO PARA COLETA DE AMOSTRA DE ÁGUA

COLETA DE AMOSTRA NO RESERVATÓRIO DE ÁGUA DO SISTEMA DE REÚSO DE ÁGUA E RECUPERAÇÃO DE ENERGIA TÉRMICA RESIDUAL PARA COGERAÇÃO DE ELETRICIDADE

Uso: laboratorial para alimentação e arrefecimento de um destilador de água tipo “Pilsen” e posterior recuperação de energia térmica residual para cogeração de energia elétrica. Água potável.

Natureza: Tratada. Água proveniente de poço artesiano.

Área de influência: Laboratório G008 da Universidade Federal da Integração Latino-Americana.

Características da área de estudo:

Variabilidade espacial: reservatório de 0,2 m³, fluxo fechado com reposição automática de perdas devido a evaporação.

Variabilidade temporal: coletas quinzenais para o reservatório e semestrais para a tubulação de alimentação do reservatório.

PROCEDIMENTO DE PREPARO DOS FRASCOS E COLETA DAS AMOSTRAS

- 1) Adquirir frascos de 500 ml fabricados em vidro neutro na cor âmbar;
- 2) Lavar os frascos realizando um enxágue em triplicata com água deionizada e posterior autoclavagem dos mesmos;
- 3) Preparar frascos adicionais, pois podem ocorrer situações inesperadas como contaminação ou quebras do recipiente, obrigando o responsável pela coleta a substituir o frasco e repetir a coleta;
- 4) Não se deve tocar a parte interna dos frascos nem deixar os mesmos expostos a pó, fumaça e outras impurezas que possam contaminá-los;
- 5) O responsável pela coleta deve realizar a anti-sepsia nas mãos com álcool 70°GL, além de não fumar, não falar ou comer durante o procedimento da coleta de amostras;
- 6) Deve-se usar EPI's como luvas, avental e máscara, sendo que devido a natureza das análises físicos químicas, as luvas devem ser isentas de talco.

EQUIPAMENTOS UTILIZADOS EM CAMPO

Realizar checklist para verificar se estão sendo levados todos os itens necessários para a realização da coleta:

CHECKLIST	
Material	Check
Ficha de coleta	
Caneta	
Frasco coletor	
Luvras de látex	
Etiqueta de identificação	
Chaves do laboratório	
Phmetro portátil	

ANEXO A – RELATÓRIO DE ANÁLISE DA ÁGUA DA UNILA CAMPUS JU



Relatório de Ensaio Nº: 2309.2023.V0.A

01. Dados Contratação:	
Solicitante:	
Razão Social:	UNILA - UNIVERSIDADE FEDERAL DA INTEGRACAO LATINO-AMERICANA
Proposta Comercial:	972.2023.V0

02.1. Dados da Amostragem:12925.2023				
Descrição da Amostra:	Saída do Poço	Data de Amostragem:	01/08/2023 10:07:00	
Matriz e Origem Amostra:	Água - Água Bruta			
Endereço Amostragem:	AV SILVIO AMERICO SASDELLI,1842 EDIF LORIVO VILA RESIDENCIAL A - FOZ DO IGUACU/PR CEP: 85866000			
Responsável pela Amostragem:	Amarildo.Rodrigues			
Data Recebimento:	01/08/2023 15:42:00			
Data Início Amostra:	01/08/2023 10:07:00	Data Conclusão Amostra:	02/08/2023 15:50:34	
Resultados				
Parâmetros	Resultados	Un	Portaria GM/MS Nº 888	Metodologia
Cor Aparente	<5	uH	até 15	Método HACH 8025
Turbidez	0,46	NTU	até 5,00	SMWW 23ª Ed - Met 2130B
pH em campo	9,50		de 6,00 a 9,50	SMWW 23ª Ed - Met 4500H+B
Temperatura em campo	20,1	°C	N.A	SMWW 23ª Ed - Met 2550B
Teste de P/A de Coliformes Totais e E. Coli	Ausente	-	N.A	SMWW 23ª Ed - Met 9221D

03.1. Dados da Amostragem:12926.2023				
Descrição da Amostra:	Saída do Tratamento	Data de Amostragem:	01/08/2023 10:11:00	
Matriz e Origem Amostra:	Água - Água Consumo Humano			
Endereço Amostragem:	AV SILVIO AMERICO SASDELLI,1842 EDIF LORIVO VILA RESIDENCIAL A - FOZ DO IGUACU/PR CEP: 85866000			
Responsável pela Amostragem:	Amarildo.Rodrigues			
Data Recebimento:	01/08/2023 15:42:00			
Data Início Amostra:	01/08/2023 10:11:00	Data Conclusão Amostra:	02/08/2023 15:50:34	
Resultados				
Parâmetros	Resultados	Un	Portaria GM/MS Nº 888	Metodologia
Cor Aparente	<5	uH	até 15	Método HACH 8025
Turbidez	0,44	NTU	até 5,00	SMWW 23ª Ed - Met 2130B
Cloro Livre em campo	0,78	mg/L	de 0,20 a 2,00	SMWW 23ª Ed - Met 4500Cl G
pH em campo	9,10		de 6,00 a 9,50	SMWW 23ª Ed - Met 4500H+B
Temperatura em campo	21,2	°C	N.A	SMWW 23ª Ed - Met 2550B
Teste de P/A de Coliformes Totais e E. Coli	Ausente	-	N.A	SMWW 23ª Ed - Met 9221D

04.1. Dados da Amostragem:12927.2023				
Descrição da Amostra:	Cozinha do Restaurante	Data de Amostragem:	01/08/2023 10:13:00	
Matriz e Origem Amostra:	Água - Água Consumo Humano			

BrasÁgua Tratamento de Água e Efluentes do Brasil Ltda - CNPJ 05.345.846/0001-87
 (45) 3038.8108 - Rua Manaus, 870 - CEP 85813-100 - Cascavel - PR
 www.brasagua.com.br - laboratorio@brasagua.com.br

Versão: v01 - Certificado: 2309.2023 || Data Emissão:03/08/2023 - Página.:1/3

Endereço Amostragem: AV SILVIO AMERICO SASDELLI,1842 EDIF LORIVO VILA RESIDENCIAL A - FOZ DO IGUAQU/PR **CEP:** 85866000
Responsável pela Amostragem: Amarildo.Rodrigues
Data Recebimento: 01/08/2023 15:42:00
Data Início Amostra: 01/08/2023 10:13:00 **Data Conclusão Amostra:** 02/08/2023 15:50:34

Resultados				
Parâmetros	Resultados	Un	Portaria GM/MS Nº 888	Metodologia
Cor Aparente	<5	uH	até 15	Método HACH 8025
Turbidez	0,45	NTU	até 5,00	SMWW 23ª Ed - Met 2130B
Cloro Livre em campo	0,71	mg/L	de 0,20 a 2,00	SMWW 23ª Ed - Met 4500Cl G
pH em campo	9,20		de 6,00 a 9,50	SMWW 23ª Ed - Met 4500H+B
Temperatura em campo	21,3	°C	N.A	SMWW 23ª Ed - Met 2550B
Teste de P/A de Coliformes Totais e E. Coli	Ausente	-	N.A	SMWW 23ª Ed - Met 9221D

05.1. Dados da Amostragem:12928.2023

Descrição da Amostra: Banheiro Masculino do Laboratório **Data de Amostragem:** 01/08/2023 10:15:00
Matriz e Origem Amostra: Água - Água Consumo Humano
Endereço Amostragem: AV SILVIO AMERICO SASDELLI,1842 EDIF LORIVO VILA RESIDENCIAL A - FOZ DO IGUAQU/PR **CEP:** 85866000
Responsável pela Amostragem: Amarildo.Rodrigues
Data Recebimento: 01/08/2023 15:42:00
Data Início Amostra: 01/08/2023 10:15:00 **Data Conclusão Amostra:** 02/08/2023 15:50:34

Resultados				
Parâmetros	Resultados	Un	Portaria GM/MS Nº 888	Metodologia
Cor Aparente	<5	uH	até 15	Método HACH 8025
Turbidez	0,40	NTU	até 5,00	SMWW 23ª Ed - Met 2130B
pH em campo	9,25		de 6,00 a 9,50	SMWW 23ª Ed - Met 4500H+B
Temperatura em campo	21,2	°C	N.A	SMWW 23ª Ed - Met 2550B
Teste de P/A de Coliformes Totais e E. Coli	Ausente	-	N.A	SMWW 23ª Ed - Met 9221D

Legenda

uH - Unidades de Cor Hazen, NTU - Unidades Nefelométricas de Turbidez, °C - Graus Celsius, Aus/Pres em 100mL - Presença ou Ausência em 100 mililitros, mg/L - Miligramas por Litro

Relatório de Ensaio tipo A - Ensaio Acreditado conforme ABNT NBR ISO/IEC 17025:2017

L.Q. - Limite de Quantificação, VMP - Valor Máximo Permitido, N.A. - Não Aplíavel

Informações Importantes:

Ensaio de pH em campo executados in loco
 Ensaio de Temperatura em campo executados in loco
 Ensaio de Cloro Livre em campo executados in loco

Este relatório tem seu valor restrito a amostra entregue no laboratório e seus resultados se referem somente aos itens ensaiados.
 A reprodução deste documento só poderá ser integral e depende da aprovação, do laboratório emitente e do cliente.



Priscila M. Ribeiro

PRISCILA MARCHIORE RIBEIRO
Responsável pela Análise

Tatiana Regina de Oliveira

TATIANA REGINA DE OLIVEIRA
Responsável Técnico

Código de Verificação: 0010400099007011494880202300000

ANEXO B – PROTOCOLO DETERMINAÇÃO DA DUREZA DA ÁGUA

Dureza total

A dureza total é calculada como sendo a soma das concentrações de íons cálcio e magnésio na água, expressos como carbonato de cálcio.

A dureza de uma água pode ser temporária ou permanente.

A dureza temporária, também chamada de dureza de carbonatos, é causada pela presença de bicarbonatos de cálcio e magnésio. Esse tipo de dureza resiste à ação dos sabões e provoca incrustações. É denominada de temporária porque os bicarbonatos, pela ação do calor, se decompõem em gás carbônico, água e carbonatos insolúveis que se precipitam.



A dureza permanente, também chamada de dureza de não carbonatos, é devida à presença de sulfatos, cloretos e nitratos de cálcio e magnésio, resiste também à ação dos sabões, mas não produz incrustações por serem seus sais muito solúveis na água. Não se decompõe pela ação do calor.

A portaria nº 518/2004 do Ministério da Saúde estabelece para dureza o teor de 500 mg/L em termos de CaCO_3 como o valor máximo permitido para água potável.

Método de determinação

Titulação com EDTA

Material necessário:

- a) bureta de 50 ml;
- b) pipeta volumétrica de 25 ml;
- c) balão volumétrico de 50 ml;
- d) beaker de 100 ml;
- e) frasco erlenmeyer de 250 ml;
- f) solução padrão de EDTA 0,01 M;

- g) solução tampão;
- h) indicador eriochrome Black T;
- i) inibidor I - cianeto de sódio P.A em pó;
- j) inibidor II - sulfeto de sódio.

Técnica

- a) tomar 25 ml da amostra e diluir para 50 ml com água destilada em balão volumétrico;

Manual Prático de Análise de Água 47

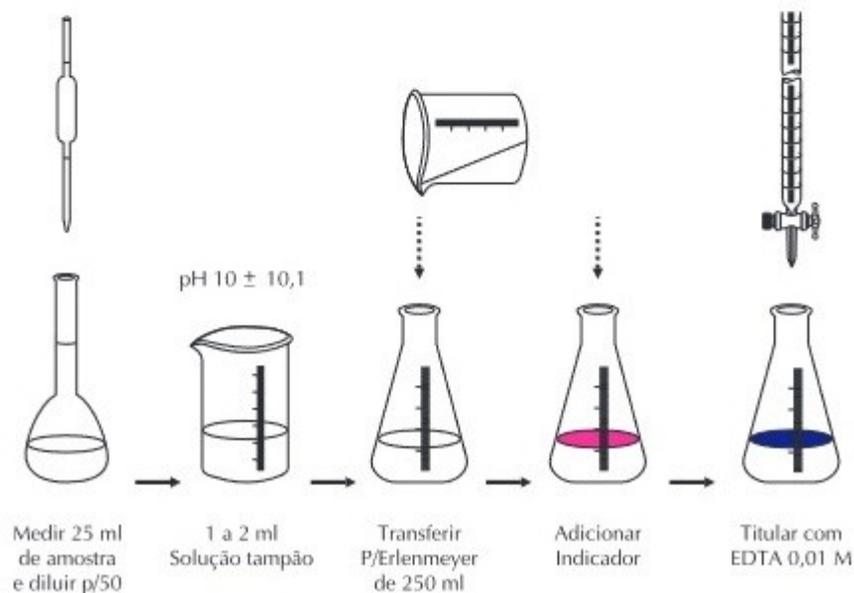
- b) transferir para um becker de 100 mL e adicionar 1 a 2 ml da solução tampão para elevar o pH a $10 \pm 0,1$;
- c) transferir para um frasco Erlenmeyer de 250 ml e adicionar aproximadamente 0,05 gramas do Indicador Eriochrome Black T;
- d) titular com EDTA 0,01M agitando continuamente até o desaparecimento da cor púrpura avermelhada e o aparecimento da cor azul (final da titulação);
- e) anotar o volume de EDTA gasto (ml);
- f) fazer um branco com água destilada;
- g) subtrair o volume de EDTA gasto na titulação do branco do volume de EDTA gasto na titulação da amostra. A diferença é o volume que será aplicado no cálculo abaixo.

Cálculo

$\text{Dureza Total em mg/lCaCO}_3 = \frac{\text{ml de EDTA} \times 1000 \times Fc}{\text{ml de amostra}}$
--

- Notas:**
1. A ausência de um ponto de viragem definido, geralmente, indica a necessidade de adição de um inibidor ou que o indicador está deteriorado;
 2. Não leve mais do que 5 minutos para a titulação, medido após a adição da solução tampão;
 3. Caso a dureza da água seja muito baixa, use amostra maior, 50 a 250 ml adicionando proporcionalmente maior quantidade de solução tampão, do inibidor e indicador;
 4. Se precisar usar o inibidor adicionar 20 gotas do inibidor II;
 5. F_c = Fator de correção do EDTA quando houver e for diferente de 1.

Fluxograma da análise



ANEXO C – PROTOCOLO DETERMINAÇÃO DE CLORO LIVRE NA ÁGUA

Determinação do teor de cloro ativo em uma solução de cloro (hipoclorito de sódio e hipoclorito de cálcio)

Material necessário:

- frasco Erlenmeyer de 250 ou 500 ml;
- bureta de 50 ml;
- pipeta volumétrica de 1; 5 e 10 ml;
- balança de precisão.

Reagentes:

- tiosulfato de sódio 0,1N ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$);
- iodeto de potássio (KI);
- ácido acético P.A;



76 Fundação Nacional de Saúde

- indicador de amido.

Técnica

- medir 1,0 ml da solução;
- Dissolver em 50 ml de água destilada;
- Adicionar 5,0 ml de ácido acético concentrado (glacial);
- Adicionar 1,0 g de iodeto de potássio;
- Titular com a solução de tiosulfato de sódio 0,1 N;
- Anotar os ml de tiosulfato gastos.

Cálculo

$$\% \text{ de cloro} = \frac{(A-B) \times N \times 35,45}{P \times 10}$$

onde:

A = ml de tiosulfato gasto na titulação da amostra;

B = ml de tiosulfato gasto no branco;

N = Normalidade do tiosulfato;

P = Peso ou volume do produto.

Observação: Dependendo da concentração da solução a ser analisada usar um peso ou volume que não gaste mais do que a capacidade da bureta utilizada, de tiosulfato de sódio 0,1 N.
Fazer um branco com água destilada.



ANEXO D –PROTOCOLO DETERMINAÇÃO DE SÓLIDOS DISSOLVIDOS TOTAIS



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL
DISCIPLINA: ENS 7006 - QUALIDADE DE ÁGUA I
PROFESSOR: William Gerson Matias



DETERMINAÇÃO DE SÓLIDOS

- 1) **GENERALIDADES:** A carga de sólidos presentes nos corpos d'água apresentam o conjunto de substâncias de natureza orgânica e inorgânica dissolvidas (resíduos fixos, portanto, menos os gases dissolvidos) e em suspensão (sedimentáveis ou não). O excesso de sólidos dissolvidos na água pode causar alterações de sabor e problemas de corrosão. Já os sólidos em suspensão, provocam a turbidez da água danificando-a esteticamente, impedindo a penetração da luz.
- 2) **PRINCÍPIOS GERAIS:** Os testes para determinação das diversas formas de resíduos são de natureza empírica e não determinam substâncias químicas específicas, mas sim classes de substâncias que têm propriedades físicas e respostas à secagem e à ignição semelhantes.
- 3) **INTERFERENTES:** Os resultados de sólidos estão sujeitos a erros devido a perda de compostos voláteis durante a evaporação, perda de CO₂ e compostos minerais voláteis durante a ignição, decomposição de compostos. Os resultados de amostras que contêm quantidade elevada de óleos e graxas são duvidosos, dada a dificuldade de secagem até peso constante no intervalo de tempo razoável.
- 4) **PROCEDIMENTO:**
 - 4.1) **Preparação dos cadinhos:**
 - Lavar os cadinhos com sabão e enxaguar com muita água destilada;
 - Aquecer em mufla o cadinho a 550°C por 15 minutos;
 - Deixar esfriar parcialmente e em seguida introduzi-lo em um dessecador para resfriamento completo;
 - Pesar o cadinho após o resfriamento completo e obter o peso (**P1**).

5.5) Sólidos Dissolvidos Totais:

- Toma-se 100 ml da amostra agitada convenientemente e filtra-se com auxílio de funil e papel filtro (preferencialmente com poro igual a 0,45µm);
- Recolhe-se o filtrado em um cadinho e segue-se o mesmo procedimento do item (5.2).

$$SDT (mg/L) = \frac{(P_2 - P_1)(g) \times 10^6}{V (mL)}$$

P_2 - Peso de cápsula mais resíduo filtrado seco (g).

ANEXO E – PROTOCOLO CONTAGEM DE BACTÉRIAS HETEROTRÓFICAS

Contagem de bactérias heterotróficas

Material necessário

- a) placa de Petri;
- b) pipeta graduada;
- c) bico de Bunsen ou lamparina a álcool;
- d) plate *Count Agar*;
- e) estufa bacteriológica;
- f) contador de colônias.

Execução do ensaio

- a) transferir, com pipeta estéril, 1 mL da amostra para uma placa de Petri previamente esterilizada;
- b) entreabrir a placa e adicionar o meio de cultura, previamente fundido e estabilizado em banho-maria a 44-46°C, contido no tubo de ensaio;
- c) homogeneizar o conteúdo da placa em movimentos circulares moderados em forma de (∞), em torno de 10 vezes consecutivas;
- d) quando o meio de cultura se solidificar, incubar a placa em posição invertida a $35 \pm 0,5^\circ\text{C}$ durante 48 ± 3 horas;
- e) no final do período de incubação, fazer a contagem das colônias com o auxílio de um contador de colônias.

Expressão dos resultados

Os resultados são expressos como número de colônias de bactérias/mL ou Unidades Formadoras de Colônias (UFC)/mL.

Notas:

- a) antes de iniciar os exames, desinfetar a bancada do laboratório usando uma solução de álcool etílico a 70% ou outro desinfetante que não deixe resíduo;
- b) todas as amostras a serem examinadas devem ser homogeneizadas pelo menos 25 vezes;
- c) não esquecer de flambar a boca dos tubos de ensaio contendo meios de cultura, antes de usá-los;
- d) o tiosulfato de sódio a 10% colocado nos frascos de coleta é para neutralizar a ação do cloro;
- e) as placas de Petri devem ser colocadas na posição invertida para evitar a condensação de água na superfície do ágar;
- f) fazer a contagem padrão de bactérias heterotróficas, sempre em duplicata.