

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE MINAS GERAIS
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

Paulo Fonsêca Marinho Júnior

**AVALIAÇÃO DE UMA CHAMINÉ SOLAR COMBINADA PARA
DESSALINIZAÇÃO DE ÁGUA E GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

Belo Horizonte
2021

Paulo Fonsêca Marinho Júnior

**AVALIAÇÃO DE UMA CHAMINÉ SOLAR COMBINADA PARA
DESSALINIZAÇÃO DE ÁGUA E GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Sistemas Térmicos e Fluidos

Orientadora: Cristiana Brasil Maia

**Belo Horizonte
2021**

FICHA CATALOGRÁFICA

Elaborada pela Biblioteca da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais

M338a Marinho Júnior, Paulo Fonsêca
Avaliação de uma chaminé solar combinada para dessalinização de água e geração de energia elétrica / Paulo Fonsêca Marinho Júnior. Belo Horizonte, 2021.
149 f. : il.

Orientadora: Cristiana Brasil Maia
Dissertação (Mestrado) – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

1. Energia elétrica - Produção. 2. Dessalinização da água. 3. Água potável. 4. Chaminés. 5. Coletores solares. 6. Energia - Fontes alternativas. 7. Modelos matemáticos. 8. MATLAB (Programa de computador). 9. Análise econômica. I. Maia, Cristiana Brasil. II. Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. III. Título.

SIB PUC MINAS

CDU: 621.472

Paulo Fonsêca Marinho Júnior

**AVALIAÇÃO DE UMA CHAMINÉ SOLAR COMBINADA PARA
DESSALINIZAÇÃO DE ÁGUA E GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Sistemas Térmicos e Fluidos

Prof^ª. Dr^ª. Cristiana Brasil Maia – PUC Minas (Orientadora)

Prof^ª. Dr^ª. Mara Nilza Estanislau Reis – PUC Minas (Banca Examinadora)

Prof. Dr. Márcio Fonte Boa Cortez – UFMG (Banca Examinadora)

Belo Horizonte, 24 de Setembro de 2021.

*À minha família, amigos e à minha cidade,
Pois não importa onde estamos no mundo, nossas raízes serão sempre o nosso verdadeiro
lar.*

AGRADECIMENTOS

Concluir um mestrado, pesquisar incansavelmente sobre um tema, um tema que nos motiva, que de alguma forma mexa verdadeiramente conosco, definitivamente não é uma tarefa fácil. Concluir um mestrado em uma época marcada por uma pandemia mundial então, na maior parte do tempo tendo de ficar em casa, preocupar com seus, se manter vivo e são e ainda produtivo, sim, foi um dos maiores quicá o maior desafio da minha vida.

Justamente por isso, seria impossível chegar até aqui e não agradecer verdadeiramente todos aqueles que participaram e me ajudaram em todo esse processo. Agradeço e partilho deste trabalho a todos que de alguma forma, por vezes mais intensa ou não contribuíram para sua conclusão:

A Deus por todas as oportunidades concedidas. Aos meus pais, Paulo e Vânia, por todo carinho, amor e afinho a mim dedicado e acima de tudo por sempre acreditarem em mim. As minhas irmãs, Kellen e Karina, por sempre me acompanharem em tantas vezes e em diversos sentidos serem o alicerce fundamental ao meu crescimento. Aos meus sobrinhos e afilhados, por sempre trazerem alegria em tempos obscuros, e quão numerosos foram esses nos últimos anos não é mesmo? Ao Eduardo Magalhães, pelo incentivo, paciência, amor e milhares de xeroxes; por aguentar firme e fielmente meu instável humor nos momentos mais difíceis me apoiando em todos eles.

A minha super e incrível orientadora Cristiana Brasil, aqui, não cabem palavras suficientes para agradecer-lá. Muito obrigado, por toda orientação, apoio, conselhos, paciência e amizade construída em todos esses anos, por sempre acreditar em mim e conseguir ver o melhor de cada situação para que este trabalho tenho sido construído. Sem você Cris, definitivamente esse sonho não teria sido concretizado nesses papéis que hoje quem lê tem em mãos.

A todos os professores que passaram em minha vida, os quais direta e indiretamente contribuíram tanto para a realização deste trabalho quanto na concepção do ser humano que me tornei hoje. Em especial ao professor Sérgio Hanriot, pelos conselhos, aulas e acompanhamento nos momentos difíceis. A Janaína de Oliveira Castro Silva, por ter tanto me ajudado, motivado e acreditado em mim ainda no começo da minha carreira acadêmica, sendo sempre um exemplo de determinação e excepcional estudante a ser seguido. Aos funcionários do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, em especial a Valéria Aparecida Gomes, pelas conversas, ensinamentos e toda sua disposição em sempre fazer o melhor para cada um de nós.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo suporte financeiro durante o desenvolvimento deste trabalho. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

A minha grande amiga e exímia arquiteta Thaís Eugênia, pela paciência, carinho e dedicação, por tanto me ensinar a fazer desenhos e imagens incríveis para este trabalho, por me ajudar a segurar o boi pelo chifre nas dificuldades e deixar o que era simples simplesmente brilhante. Amiga que orgulho desta profissional que você se tornou, você brilha! Muito obrigado.

A todos meus amigos de caminhada e longa data, em especial a Rafael Marcial, Diogo Zidan, Natália Branco, Isadora Marinho, Lucas Miranda, Isabella Marques, Lucas Cavalcanti, Natália Pires e a todos aqueles que em algum momento e de alguma forma fizeram toda essa caminhada deixar de ser árdua, pela motivação, por vezes terem tido de comprar rifas pra ajudar o mestrando a pagar as publicações, pelos momentos de descontração, me fazendo esquecer das obrigações e sendo respiro para poder então voltar à elas e confiar em mim com muito mais empenho e energia.

A todos os meus alunos, que tanto de mim levam mas que muito mais em mim deixam, sendo fonte constante de inspiração e fé na humanidade, me dando força e motivação a estudar sempre, pra poder ser em todo tempo a minha melhor versão, tudo isso é verdadeiramente por e para vocês.

Por fim, a cada um que por mim em algum momento tenha diretamente me ajudado, aos que confiam, levantam e acreditam na mudança do hoje para um amanhã mais justo, melhor e igualitário os meus sinceros: Muito obrigado!

“Aos ignorantes, ensinem o máximo de coisas que puderem; a sociedade é culpada por não ministrar a instrução gratuita; ela é responsável pelas trevas que produz. Uma alma cheia de sombras, é onde o pecado acontece, e culpa não é de quem pecou, mas de quem fez a sombra.” (Os miseráveis – Victor Hugo)

RESUMO

Os aumentos contínuos da população mundial e dos padrões de consumo levaram ao aumento da demanda mundial de água e energia. Água e energia são bens essenciais para a vida humana. Nas últimas décadas a demanda energética tem apresentado um crescimento elevado, incentivando a busca por fontes renováveis de energia. Ao mesmo tempo, a água potável vem se tornando também um recurso escasso. A água potável representa uma pequena fração da água disponível no planeta. O processo de dessalinização de água consome muita energia, o que levou à busca de fontes renováveis de energia para a dessalinização de água. A energia solar é uma fonte abundante, permanente, renovável e não poluente. Chaminés solares são dispositivos projetados para a geração de energia a partir da energia solar. Observa-se, no entanto, que a eficiência de conversão de energia solar nas chaminés solares é baixa. Para se aumentar essa eficiência, têm sido propostas na literatura novas configurações, envolvendo o uso combinado de geração de energia. Esse trabalho propõe um modelo matemático e econômico para uma chaminé solar para produção de energia e água potável para a cidade de Brumadinho, Brasil. A chaminé solar proposta apresenta como principais componentes um coletor solar, uma torre, uma turbina eólica e um condensador de alta eficiência. Propôs-se então um modelo para a determinação da potência de saída e a quantidade de água produzida por uma chaminé solar de grande porte a partir de um condensador de alta eficiência por meio do software MATLAB, estimando seu desempenho quando aplicada no município de Brumadinho em Minas Gerais, para condições definidas de radiação solar incidente e condições ambientais, baseado em modelos da literatura. Foi também realizada uma análise econômica simplificada para permitir uma comparação com o preço da energia gerada por usinas hidrelétricas, que representam a principal fonte de energia no Brasil atualmente.

Palavras-chave: Chaminé Solar. Condensador de Alta Eficiência. Dessalinização. MATLAB. Análise Econômica.

ABSTRACT

The continuous increase in the world population and consumption patterns has led to an increase in world demand for water and energy. Drinking water represents a small fraction of the water available on the planet. The desalination of water consumes a lot of energy. As a consequence, it becomes necessary to search for renewable energy sources for this process. Solar energy is an abundant, permanent, renewable, and non-polluting source. Solar chimneys are devices designed to generate energy from solar energy. It is possible to observe, however, that the efficiency of the conversion of solar energy in solar chimneys is low. To increase this efficiency, the literature proposes new configurations that involve the combined use of power generation for other purposes. This work aims at the numerical evaluation of a combined solar chimney for the desalination of brackish water and the generation of electric energy. An initial analysis involved the simulation of the flow inside a small solar chimney using the computational code ANSYS-CFX. The results indicated that the maximum temperature reached would not be sufficient for desalination purposes. Then, an analytical model was proposed to determine the output power and the amount of water produced by a large solar chimney. Defined conditions of incident solar radiation and environmental conditions were considered, based on models in the literature. In this study, a simplified economic analysis will be carried out in order to make a comparison with the price of energy generated by hydroelectric plants, which currently represent the main source of energy in Brazil.

Keywords: Solar chimney. Desalination. Mathematical Modeling. Economic Study.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – Matriz de energia elétrica brasileira.....	38
FIGURA 2 – Comparação entre o potencial energético provindo de fontes renováveis do Brasil versus mundo.....	47
FIGURA 3 – Exportações minerárias brasileiras no ano de 2018.....	51
FIGURA 4 – Regiões de investigação da insalubridade da água do rio Paraopeba após o rompimento da Barragem 1 em Brumadinho, MG.....	55
FIGURA 5 – Diagrama de fases do processo de dessalinização.....	59
FIGURA 6 – Espalhamento do rejeito até a confluência com o rio Paraopeba.....	63
FIGURA 7 – Comportamento do ar no interior da chaminé solar.....	64
FIGURA 8 – O protótipo de chaminé solar executado em Manzanares, Espanha.....	65
FIGURA 9 – Esquema de uma chaminé solar com um destilador solar direto.....	69
FIGURA 10 – Sistema proposto de dessalinização e geração de energia elétrica.....	79
FIGURA 11 – Funcionamento do sistema proposto.....	80
FIGURA 12 – Possível área para a instalação da chaminé solar estudada no município de Brumadinho -Minas Gerais, Brasil.....	97
FIGURA 13 – Média mensal de radiação para a cidade de Brumadinho – MG (W/m ²).....	98
FIGURA 14 – Localização geográfica de Brumadinho no estado de Minas Gerais, Brasil.....	99
FIGURA 15 – Fluxograma da análise numérica – Determinando a eficiência total do sistema – Primeira parte: Determinando a temperatura do ar de operação da turbina da chaminé.....	100
FIGURA 16 – Fluxograma da análise numérica – Determinando a eficiência total do sistema – Primeira parte: Determinando a energia produzida pela turbina.....	101
FIGURA 17 – Fluxograma da análise numérica – Determinando a eficiência total do sistema – Primeira parte: Determinando a energia produzida pelo condensador somado com a turbina e assim obtendo a eficiência total do sistema.....	102
FIGURA 18 – Fluxograma da análise econômica – Segunda Parte - Determinando o custo de água e o retorno financeiro do projeto.....	103
FIGURA 19 – Variação da potência total produzida pela radiação solar no sistema.....	109

FIGURA 20 – Variação da potência elétrica total produzida pela velocidade do vento na entrada da chaminé.....	110
FIGURA 21 – Variação da potência elétrica total produzida pelo raio do coletor.....	112
FIGURA 22 – Variação da potência elétrica total produzida pela altura da chaminé.....	113
FIGURA 23 – Variação da potência elétrica produzida pelo raio da chaminé.....	114
FIGURA 24 – Variação da potência elétrica total produzida pela eficiência da turbina eólica.....	115
FIGURA 25 – Variação da potência elétrica total produzida pela eficiência do gerador.....	116
FIGURA 26 – Variação da potência elétrica total produzida pela eficiência total do sistema.....	117
FIGURA 27 – Receita anual de eletricidade versus Raio do coletor.....	123
FIGURA 28 – Preço da água dessalinizada versus Raio do coletor.....	124
FIGURA 29 – Receita anual de eletricidade versus Altura da chaminé.....	125
FIGURA 30 – Preço da água dessalinizada versus Altura da chaminé.....	126
FIGURA 31 – Variação do investimento anual versus Vida útil.....	127
FIGURA 32 – Preço da água a ser dessalinizada versus Vida útil.....	128

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Estado da arte do estudo de chaminés solares para dessalinização.....	74
TABELA 2 – Parâmetros de entrada e resultados numéricos da chaminé solar para dessalinização de água e geração de energia elétrica.....	104
TABELA 3 – Sistema de preços dos dispositivos adotados para análise econômica deste trabalho.....	119
TABELA 4 – Comparação Econômica do desempenho da chaminé solar com diferentes períodos de operação.....	120
TABELA 5 – Sistema de preços adotado para análise econômica deste trabalho.....	122

LISTA DE SÍMBOLOS

A_{ch}	Área da chaminé [m ²]
A_{coll}	Área do coletor [m ²]
A_{cond}	Área do condensador [m ²]
c	Velocidade local do som [m/s]
c_p	Calor específico à pressão constante [kJ/(kg.K)]
c_{p2}	Calor específico do ar operacional na saída da chaminé [kJ/(kg.K)]
c_{pa}	Calor específico do ar ambiente na entrada do condensador [kJ/(kg.K)]
CR_{min}	Relação de capacidade mínima de ar operacional [kW/°C]
CR_2	Razão da capacidade de ar operacional na saída da chaminé [kW/°C]
CRA_2	Razão da capacidade de ar operacional na entrada do condensador [kW/°C]
$CUSTO_{água}$	Preço anual da produtividade de água dessalinizada [Euro/m ³]
D_{ch}	Diâmetro da chaminé [m]
D_{coll}	Diâmetro do coletor solar [m]
D_{cond}	Diâmetro do condensador [m]
DF	Fator de densidade [adimensional]
$E_{água}$	Receita anual de produção de água dessalinizada [Euro]
E_{at}	Preço da turbina somado ao gerador [Euro]
E_{ch}	Preço da chaminé [Euro]
E_{cond}	Preço do condensador [Euro]
E_{coll}	Preço do coletor solar [Euro]
E_{CO2}	Crédito de carbono [Euro]
E_{power}	Receita recebida pela potência anual da produção energética [Euro/ano]
E_{WY}	Receita anual de produção energética feita pela chaminé [Euro]
f	Fator de perda de atrito na chaminé [adimensional]
F_{PP}	Custo total da chaminé [Euro]

F_{yr}	Investimento anual do sistema [Euro]
g	Aceleração gravitacional [m/s^2]
h	Entalpia específica do vapor de água [$kJ/(kg.K)$]
h_{fg}	Calor latente da água [kJ/kg]
H_1	Altura da chaminé [m]
H_{ch}	Altura da chaminé [m]
I	Irradiação solar [W/m^2]
k	Condutividade térmica [$W/m.K$]
K	Razão de calores específicos [adimensional]
L	Calor latente da água a ser dessalinizada [kJ/kg]
\dot{m}_{agua1}	Vazão mássica de vapor de água dessalinizado na chaminé [kg/s]
\dot{m}_{agua2}	Vazão mássica de vapor de água dessalinizado no condensador [kg/s]
$\dot{m}_{aguateotal}$	Podutividade total de água dessalinizada [kg/s]
MACH	[adimensional]
MACH ₁	Número de MACH na entrada da chaminé [adimensional]
MACH ₂	Número de MACH na saída da chaminé [adimensional]
M_{CO2}	Quantidade de emissão de CO ₂ reduzida no sistema [ton/ano]
\dot{m}_{a2}	Vazão mássica de ar de operação na entrada do condensador [kg/s]
\dot{m}_f	Vazão mássica de ar de operação na entrada da chaminé [kg/s]
\dot{m}_{f1}	Vazão mássica de ar de operação na entrada da turbina da chaminé [kg/s]
\dot{m}_{f2}	Vazão mássica de ar de operação na saída da turbina da chaminé [kg/s]
\dot{m}_g	Vazão mássica de ar de operação na saída da chaminé [kg/s]
n	Fator de queda de pressão na turbina [anos]
n_{util}	Vida útil do sistema [anos]
P	Pressão atmosférica [Pa]

P_0	Pressão dada pela condição atmosférica [Pa]
P_1	Pressão na entrada da chaminé [Pa]
P_2	Pressão na saída da chaminé [Pa]
P_3	Pressão no condensador [Pa]
P_{SV}	Pressão de vapor saturado [Pa]
P_d	Pressão parcial do ar seco [Pa]
P_{retorno}	Tempo de espera pelo retorno financeiro do investimento inicial do sistema [anos]
P_v	Pressão parcial de vapor de água [Pa]
\dot{Q}	Taxa real de transferência de calor no condensador [kJ/s]
\dot{q}	Taxa de geração de energia por unidade de volume [W/m ³]
\dot{Q}_m	Máxima transferência de calor no condensador [kJ/s]
\dot{Q}_w	Saída de calor no condensador [kJ/kg]
R	Constante universal dos gases [J/(kg.K)]
R_d	Constante específica de ar seco [J/(kg.K)]
R_s	Constante específica de vapor [J/(kg.K)]
T	Temperatura [°C]
T_{a2}	Temperatura do ar de operação na entrada do condensador [°C]
T_{a3}	Temperatura do ar de operação na saída do condensador [°C]
T_0	Temperatura dada pela condição atmosférica [°C]
T_{01}	Temperatura do ar de operação na entrada da turbina da chaminé [°C]
T_{02}	Temperatura do ar de operação na saída da turbina da chaminé [°C]
T_1	Temperatura do ar de operação na entrada da chaminé [°C]
T_2	Temperatura do ar de operação na saída da chaminé [°C]
t	Tempo [s]
u	Velocidade vertical [m/s]
u_1	Velocidade vertical do ar na saída da turbina [m/s]

u_g	Velocidade do ar de operação na entrada do condensador [m/s]
\dot{W}_{at}	Energia produzida pela turbina [W]
\dot{W}_{wg}	Energia produzida pelo gerador [W]
\dot{W}_{TOTAL}	Potência total do sistema [W]
\dot{W}_Y	Produção de energia anual [W]
z	Altura da chaminé [m]

Símbolos Gregos

α	Número de dias em que a planta operará em um ano [adimensional]
β	Gradiente médio de densidade do ar ambiente na chaminé [kg/m ³]
β_a	Gradiente médio de densidade do ar ambiente [kg/m ³]
β_{horas}	Número de horas que a planta operará em um ano [adimensional]
ξ	Coefficiente de anuidade do sistema [adimensional]
ε	Efetividade do condensador [%]
\emptyset	Umidade relativa de ar úmido do sistema [g/kg]
ρ	Massa específica do ar [kg/m ³]
ρ_0	Densidade do ar ambiente que entra no condensador [kg/m ³]
ρ_1	Densidade do ar de operação na entrada da chaminé [kg/m ³]
ρ_2	Densidade do ar de operação na saída da chaminé [kg/m ³]
ρ_{a1}	Densidade do ar de operação na saída da turbina [kg/m ³]
ρ_{a2}	Densidade do ar de operação no condensador [kg/m ³]
ρ_g	Densidade do ar de operação na entrada do condensador [kg/m ³]
ρ_v	Densidade do vapor [kg/m ³]
η_{at}	Eficiência da turbina [%]
η_{pp}	Eficiência integrada de todo sistema [%]

η_{wg}	Eficiência do gerador [%]
θ	Coefficiente de perda total de pressão [adimensional]
ω_2	Umidade do ar operacional na entrada do condensador [$\text{kg}_{\text{agua}}/\text{kg}_{\text{arseco}}$]
ω_3	Umidade do ar operacional na saída do condensador [$\text{kg}_{\text{agua}}/\text{kg}_{\text{arseco}}$]
μ	Viscosidade cinemática [m^2/s]
¥	Preço da eletricidade onde a chaminé será implementada [Euro]
Δm_{agua}	Diferença de pressão entre a entrada e a saída da chaminé [Pa]
ΔP	Vazão mássica da quantidade de água presente no ar de entrada da chaminé [kg/s]
ΔQ	Quantidade de calor latente liberado pelo vapor de água total no sistema [kJ/kg]
ΔT_{max}	Máxima temperatura [kJ/s]

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	37
1.1 Justificativa.....	42
1.2 Objetivos.....	42
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	45
2.1 A questão energética no Brasil e no mundo.....	46
2.2 A questão da água.....	47
2.3 A água e a indústria de mineração.....	49
2.4 Brumadinho, 25 de janeiro de 2019.....	53
2.5 O processo de dessalinização.....	56
2.6 Chaminés solares.....	64
2.7 Chaminés solares para dessalinização.....	68
2.8 Estado da arte.....	72
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	79
3.1 Análise numérica da chaminé solar para dessalinização de água e geração de energia elétrica.....	79
3.2 A chaminé solar.....	82
3.3 O condensador de alta potência.....	89
3.4 Análise econômica da chaminé solar para dessalinização de água e geração de energia elétrica.....	92
4 METOLOGIA.....	97
5 RESULTADOS.....	107
5.1 Análise numérica das principais variáveis.....	107
5.1.1. Parâmetros diretamente relacionados a localização geográfica da chaminé.....	107
5.1.1.1 Radiação Solar.....	108
5.1.1.2 Velocidade do vento na entrada da chaminé.....	110
5.1.2 Parâmetros diretamente relacionados as dimensões estruturais físicas da chaminé.....	111
5.1.2.1 Raio do Coletor.....	111
5.1.2.2 Altura da Chaminé.....	113
5.1.2.3 Raio da Chaminé.....	114
5.1.3 Parâmetros diretamente relacionados as eficiências do sistema.....	115
5.1.3.1 Eficiência da turbina.....	115
5.1.3.2 Eficiência do gerador.....	116
5.1.3.3 Eficiência total do sistema.....	117
5.2 Análise Econômica.....	118
5.2.1 Raio do coletor.....	123
5.2.2 Altura da chaminé.....	125
5.2.3 Vida útil do sistema.....	126
6 CONCLUSÕES.....	129
7 REFERÊNCIAS.....	133

1 INTRODUÇÃO

A demanda crescente de água ocasionada pelo aumento populacional, a queima de combustíveis fósseis agravando o efeito estufa, o desperdício de água, a poluição dos rios ocasionada pelas atividades antropogênicas e o desmatamento crescente dos últimos anos fazem com que o mundo enfrente graves desafios relacionados tanto à disponibilidade de água potável (Campos, 2017).

Segundo Castro Silva (2014), somados a todos estes fatores, as últimas décadas vêm sendo constantemente marcadas pelo aumento da demanda energética, sendo este aumento proporcional ao aumento da população mundial. Sendo assim, a demanda por energia de combustíveis fósseis em larga escala é fonte de grande preocupação ao meio ambiente.

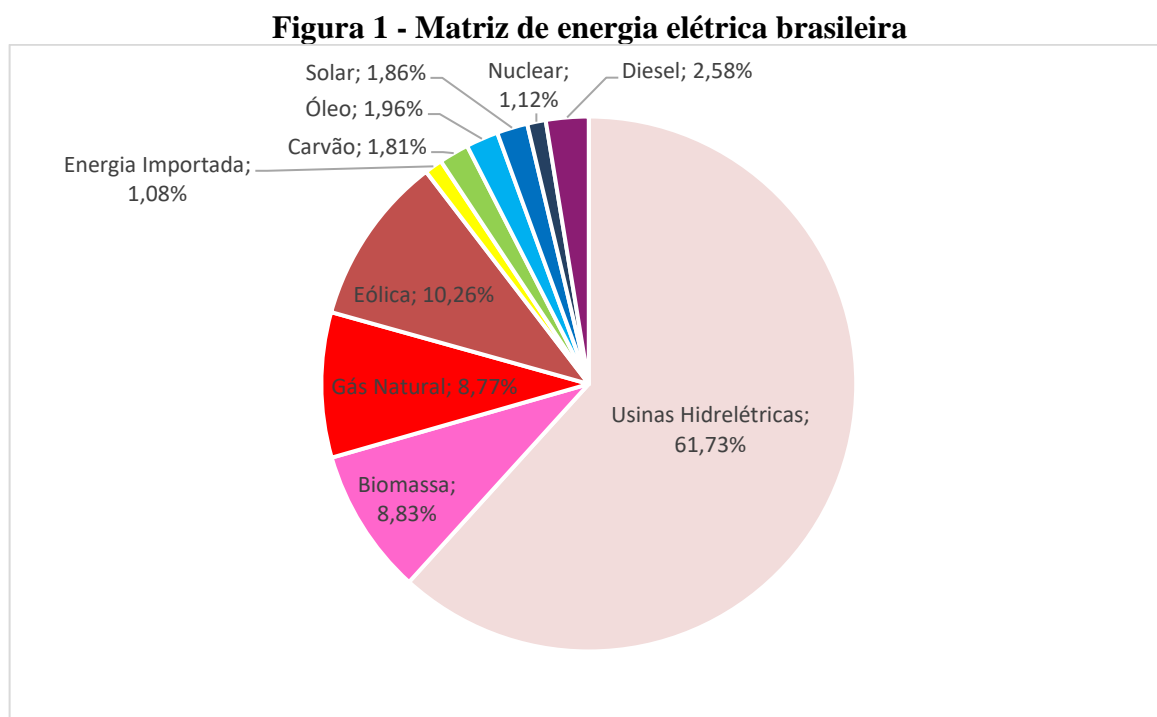
Em meados dos anos 80, a preocupação relacionada à captação de energia através do meio ambiente passou a ser uma questão mundial. Desde então, a busca por novas fontes de energia vem crescendo constantemente. De acordo com o *International Energy Outlook* (U.S. Energy Information Administration, 2016), quase todo o aumento da demanda energética mundial é proveniente de países considerados em desenvolvimento (como é o caso do Brasil). Para resolver os impactos causados pelo aumento da demanda energética estima-se que as formas de energia renovável representarão cerca de 30% do total de geração de energia mundial até o ano de 2040 (Castro Silva, 2018).

Em dados numéricos, um investimento estimado de 45 a 56 bilhões de dólares é necessário anualmente para alcançar a meta global de obtenção de energia. Projeções concluem que esses valores devem ser mantidos até o ano de 2030 (REN21, 2016). Portanto, o investimento e o desenvolvimento de energia renovável global desempenham papéis importantes para atingir metas de desenvolvimento sustentável, redução financeira de custos de obtenção de energia significativas a diversos países e principalmente como um aliado para enfrentar as mudanças climáticas (Gu e Zhou, 2020).

Energias renováveis consistem nos tipos energéticos provindos dos recursos naturais que são naturalmente reabastecidos, tendo como principais fontes a bioenergia (provindos de fontes biológicas) e as energias geotérmica, hídrica, oceânica, solar e eólica. Porém nem toda fonte natural é renovável. O urânio por exemplo é uma fonte natural, mas não renovável, pois existe em uma quantidade limitada no meio ambiente. O termo renovável refere-se apenas a uma escala humana de tempo e não à eternidade (Marinho Júnior e outros, 2018). Dessa forma, energias renováveis são aquelas geradas e fornecidas

de modo a atender as necessidades atuais, porém sem comprometer a capacidade das futuras gerações de satisfazerem as suas necessidades.

Conforme a ANEEL (2021), no Brasil, aproximadamente 83% da energia elétrica é gerada por fontes renováveis, sendo quase 62% destas de energia hidrelétrica e 21% de outras fontes alternativas (Figura 1).



Fonte: ANEEL (2021) adaptado.

A energia hidrelétrica é a principal fonte de energia explorada no Brasil. O elevado percentual proveniente dela gera uma grande dependência do país em sua matriz energética. Sendo assim, fica claro que a melhor aplicação para um país com tanta diversidade como o Brasil, baseia na utilização de uma matriz energética amplamente diversificada. Portanto, uma matriz energética baseada em grande parte nas hidrelétricas, como visto no Brasil, não é pertinente, uma vez que este tipo de matriz é completamente refém das chuvas, do clima, além de gerar grandes impactos ao meio ambiente, principalmente na sua implantação (Marinho Júnior e outros, 2018).

Devido à sua localização geográfica, características climáticas, recursos naturais e biodiversidade, o Brasil possui uma larga escala de recursos para obtenção de diversas outras fontes energéticas. Uma grande incidência solar, um extenso território litorâneo (excelente fator para a exploração de energia eólica e oceânica), bem como uma grande produção alimentícia e pecuária (notáveis para exploração bioenergética) são características comuns ao país.

A energia solar é a maior fonte de energia recebida pela Terra. A quantidade total de energia solar incidente sobre a terra é vastamente superior às necessidades energéticas atuais e previstas no mundo. Essa fonte tem potencial para satisfazer todas as necessidades de energia no futuro (Castro Silva, 2018).

A conversão energética da radiação solar também pode ser obtida de maneira indireta por meio de efeitos como o termoelétrico e o fotovoltaico, assim como em energia química, com o processo foto-bioquímico.

Em outra perspectiva, é estimado que, ainda em 2050 aproximadamente 1,8 bilhões de pessoas em todo o mundo viverão em regiões nas quais a água potável será escassa pelo menos uma vez por mês. Já em 2020, dados da ONU comprovam que mais de 4,2 bilhões de pessoas vivem sem acesso ao saneamento básico. Mais da metade da população mundial não tem esgoto tratado. Cerca de 40% dos habitantes do globo vivem sem água e sabão para lavar as mãos, o que acarreta que todos os dias mais de 800 crianças morrem de doenças, diarreia e outras infecções, motivos esses causados pela falta de saneamento básico e água contaminada (ONU News, 2020).

No Brasil, a Constituição de 1988 estabelece que as águas são bens públicos, não existindo águas particulares, e a dominialidade (responsabilidade administrativa e da gestão) é ora dos Estados, ora da União. Ou seja, são de domínio da União “os lagos, rios e quaisquer correntes de água em terrenos de seu domínio, ou que banhem mais de um estado, sirvam de limites com outros países, ou se estendam a território estrangeiro ou dele provenham, bem como os terrenos marginais e as praias fluviais”, são de domínio dos Estados bem como “as águas superficiais ou subterrâneas, fluentes, emergentes e em depósito, ressalvadas, neste caso, na forma da lei, as decorrentes de obras da União” (ANA, 2006 e Constituição, 1988).

Por sua vez, a mineração é, provavelmente, dentre as principais usuárias de água no Brasil, a que apresenta maiores peculiaridades. Abrange desde empreendimentos complexos com impactos maiores, mas ao mesmo tempo utiliza modernos e eficientes controles ambientais sobre tais impactos, incluindo medidas de mitigação e compensação, até de pequenos oleiros, garimpeiros ou extratores de areia ou cascalho, sem nenhum planejamento e controle ambiental e, muitas vezes, com indulgência da comunidade local (ANA, 2006).

Assim, ainda de acordo com ANA (2006), a água é absolutamente necessária para muitos processos e operações da mineração. Seu uso cria problemas e acarreta custos adicionais importantes ao processo como a necessidade de drenagem do sistema e a

constante fiscalização da interferência deste em sua qualidade, motivo pelo qual se requer uma rigorosa gestão e o manejo adequado dessa água.

Provenientes do processo minerário, desastres ambientais envolvendo barragens de rejeitos de mineração que resultam na poluição dos cursos d'água e que ocorreram em todo mundo (Fletcher e outros, 2006; Gelencsér e outros, 2011), tornaram-se um problema recorrente no Brasil (Souza e outros, 2021).

Em novembro de 2015, a barragem do Fundão (Distrito de Mariana no estado de Minas Gerais, Brasil) rompeu, liberando mais de 45 milhões de m³ de lama com vestígios de metais na bacia do rio Doce e no Oceano Atlântico, causando 19 mortes (Fernandes e outros, 2016; Carmo e outros, 2017; Souza e outros, 2021). O rompimento mais recente da barragem de rejeitos B1 no Córrego do Feijão (Distrito de Brumadinho, estado de Minas Gerais, Brasil) em 25 de janeiro de 2019 liberou mais de 12 milhões de m³ de lama de rejeitos de minério no rio Paraopeba e tem sido considerado o maior desastre ambiental (259 mortes e 11 pessoas desaparecidas) envolvendo rejeitos de minério, além dos impactos socioeconômicos e ambientais (CPRM, 2019 e Souza e outros, 2021). Água e sedimentos impactados por metais provenientes do processo de mineração podem ter efeitos nocivos à saúde em organismos aquáticos e também podem apresentar um risco para a saúde humana (Wu e outros, 2016; Singh e Kumar, 2017; Shil e Singh, 2019; Teramoto e outros, 2021).

Essa emergencialidade pela necessidade de água potável deverá encarecer progressivamente os custos da mesma, fazendo com que este recurso se torne cada vez menos acessível, especialmente para os mais pobres e marginalizados (Eliasson, 2015).

Uma das soluções disponíveis para os problemas envolvendo água e energia é o uso da energia solar em processos de dessalinização de águas salobras e do mar. A dessalinização consiste basicamente na remoção ou redução da concentração de sais e sólidos dissolvidos da água salgada (podendo ser esta do mar ou salobra) para obter água doce e própria para consumo. Além da remoção de minerais, este processo também remove ainda outros componentes químicos, orgânicos e biológicos (Greenlee, 2009).

Desta forma, a utilização desta tecnologia pode contornar vários problemas presentes nos processos tradicionais de dessalinização, fazendo com que essa opção se torne mais sustentável, por utilizar largamente forma de energia limpa e renovável como é a energia solar. Além disso, essa tecnologia apresenta uma larga escala de relevância social uma vez que traz opções mais viáveis economicamente para regiões mais remotas e frequentemente esquecidas nas quais a água é considerada imprópria e/ou salobra devido a diversos possíveis fatores para o evento, nos quais se destacam as atividades humanas diretamente

dependentes das águas, como o processo minerário, por exemplo (Campos e outros, 2017; Campos, 2017).

Para a realização do processo de dessalinização e a utilização de energia solar, a fim de melhorar o desempenho deste processo e alcançar a viabilidade econômica, chaminés solares têm se apresentado como dispositivos promissores (Yosif, 2014).

O princípio da chaminé solar foi inventado em 1968 pelo professor alemão Schlaich (Zou e outros, 2011). Seu funcionamento envolve a combinação de três dispositivos distintos: coletores solares, torres e turbinas. No período diurno, parte da radiação solar incidente durante o dia atravessa a cobertura transparente da chaminé, promovendo assim o aquecimento natural do solo. Uma vez aquecido, o solo transfere calor para massa de ar no interior do coletor. A massa de ar então escoar ascendentemente em direção à torre devido às forças de empuxo provenientes dos gradientes de temperatura no interior do dispositivo. Ao encontrar a torre o ar aquecido é então succionado para o exterior do dispositivo (Castro Silva, 2018). No período noturno, quando a incidência solar é cessada, o solo abaixo da chaminé libera parte do calor armazenado durante o dia para o ar, gerando um escoamento e permitindo o funcionamento contínuo do dispositivo (Marinho Júnior e outros, 2020).

Para este tipo de tecnologia, um grande número de configurações piloto já foram construídas e testadas em várias partes do mundo (Zhou e outros, 2015). A principal desvantagem das chaminés solares é sua eficiência. Quando comparada a outras formas de tecnologia para obtenção de energia ela se mostra muito baixa. O desempenho geral das chaminés solares pode ser melhorado se forem combinados os processos de dessalinização de água e geração de energia em um único sistema.

Com este trabalho pretende-se avaliar analiticamente a dessalinização de água e a geração de energia elétrica a partir de uma instalação da chaminé solar para dessalinização. Tem-se como foco do estudo o dimensionamento de uma chaminé solar para a cidade de Brumadinho, Minas Gerais. Foi investigado neste estudo um método alternativo de extração de calor e umidade da água sob o coletor de um sistema de chaminé solar para geração de energia e dessalinização feitas por meio de um condensador de alta eficiência. Além disto um modelo econômico simplificado foi feito com o objetivo de calcular todos os gastos relacionados a este projeto. O modelo foi simplificado pois não leva em consideração o “valor temporal” do dinheiro.

1.1 Justificativa

Atualmente existem poucos trabalhos relatando o uso de chaminés solares para dessalinização, mas com resultados promissores. A maioria dos estudos disponíveis na literatura se concentra em avaliações numéricas ou projeções construtivas. Estes estudos avaliam diversas possibilidades para o aumento do desempenho e eficiência da chaminé para a obtenção da água dessalinizada e da energia elétrica gerada.

Após o rompimento da barragem do Córrego do Feijão em Brumadinho em 2019, verificou-se a necessidade de revitalização do rio Paraopeba uma vez que a água se tornou salobra devido à grande concentração de rejeitos minerários. De acordo com o Instituto Mineiro de Gestão de Águas (IGAM, 2020), o rio Paraopeba possui 12.054,25 de km², sendo responsável por 5,14% do território da bacia do rio São Francisco. Este mesmo rio conta com sede em 45 municípios brasileiros, e de forma direta e indireta possui uma ligação interdependente com uma população superior a 1,3 milhões de habitantes.

Sendo assim, a construção de uma chaminé solar para dessalinização e obtenção de energia elétrica na região estudada seria de grande importância, tanto do ponto de vista da revitalização das águas do rio Paraopeba quanto na obtenção da energia elétrica gerada.

1.2 Objetivos

O principal objetivo deste trabalho é avaliar matematicamente e economicamente uma chaminé solar combinada para dessalinização de água e geração de energia elétrica no município de Brumadinho em Minas Gerais. Os objetivos específicos são:

- a) Desenvolver um modelo matemático para a simulação dos itens constantes do problema, sendo estes: a potência de saída e o volume de água dessalinizado no processo diário e anual do sistema de chaminé solar para dessalinização e geração de energia a partir de um condensador de alta eficiência estimando seu desempenho; Este modelo matemático foi desenvolvido no software de computador MATLAB a fim de comparar os valores do preço da energia proveniente da geração por meio da chaminé solar com o preço da energia gerada por usinas hidrelétricas que representam a principal fonte de energia no Brasil atualmente.
- b) A partir deste, avaliar numericamente o impacto numérico e econômico de cada um dos principais parâmetros do sistema que compõem a chaminé solar estudada em seu local de aplicação proposto

- c) Avaliar a viabilidade econômica o desempenho do sistema de chaminé solar combinada para dessalinização de água e geração de energia na cidade de Brumadinho, Minas Gerais;

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A expansão populacional do mundo, o crescimento evolutivo dos padrões de vida do ser humano, bem como os processos antropológicos que relacionam diretamente o ambiente e o meio, têm aumentado a necessidade mundial da demanda por água potável e por energia.

Porém, as inúmeras atividades antropocêntricas na contaminação e deterioração das águas, do ar e do ambiente como um todo. Com isso tem crescido constantemente a busca por tecnologias limpas e menos agressivas ao meio ambiente nas últimas décadas.

Para a questão energética procedente desta expansão populacional, dispositivos denominados chaminés solares são considerados como uma tecnologia promissora, pois, absorvem a radiação solar direta e difusa para geração de um escoamento de ar quente que pode então ser aproveitado por uma turbina e, a partir desta, gerar energia elétrica de forma natural e renovável.

Em adição a isso, para a questão da recuperação das fontes de água potáveis comprometidas a partir da atividade humana, uma das frentes mais promissoras propostas dos últimos anos é a indústria de dessalinização. Além de conciliar a retirada do excesso de sal e outras impurezas da água. Os sistemas de dessalinização mais comuns não dependem de combustíveis fósseis, portanto, são capazes de reduzir a pegada de carbono (Hohmeyer e Bohm, 2015). Assim sendo, a união dessas duas tecnologias para a obtenção de energia limpa e água potável passa a ser considerada uma alternativa sustentável e de curto prazo para a solução tanto da questão energética quanto na questão da água.

Desta forma, neste capítulo serão apresentadas a questão da água em parâmetros mundiais e brasileiros e sua relação com o processo minerário, o desastre em Brumadinho, no dia 25 de janeiro de 2019 (fator este que foi um dos pilares motivadores para a realização deste trabalho), o processo de dessalinização das águas bem como a tecnologia das chaminés solares (isoladamente e em junção com o processo de dessalinização).

2.1 A questão energética no Brasil e no mundo

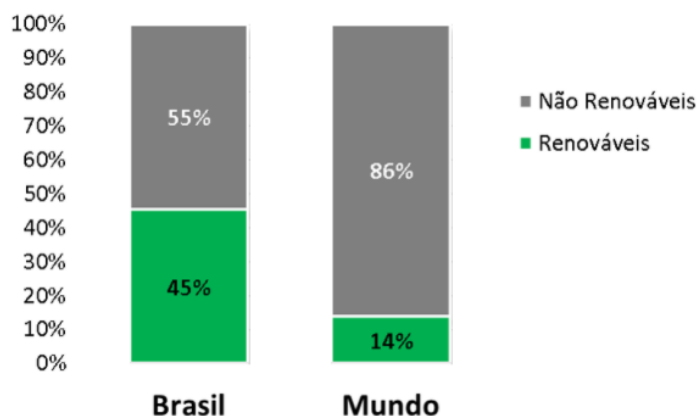
De acordo com o jornal New York Times (2020) demógrafos das Nações Unidas têm antecipado desde o ano de 2019 que a população mundial pode parar de crescer até 2100, devido ao atual declínio das taxas de fertilidade, escassez dos recursos naturais e epidemia mundial de corona vírus, projetando um pico de 10,9 bilhões de pessoas no final do século, em comparação com cerca de 7,8 bilhões agora.

Uma vez alcançado o valor projetado de 10,9 bilhões de pessoas (ONU, 2021) a demanda energética pode chegar a se duplicar. Em decorrência disso, poderá ocorrer uma grande crise mundial em razão da grande dependência de fontes não renováveis tais como carvão, petróleo e gás natural. Neste contexto, a preocupação relacionada à captação de energia para com o meio ambiente passa a ser também uma questão mundial (ONU, 2020).

Historicamente, dados divulgados pelo Ministério de Minas e Energia Brasileiro (2019) afirmam que o Brasil obteve a máxima participação do petróleo e de seus derivados na matriz energética no ano de 1979, quando atingiu 50,4% de toda sua matriz dependente dele. Para os anos de 1973 até 2018, também o Ministério de Minas e Energia Brasileiro (2019), evidenciou uma redução de 11,2 pontos percentuais deste número, seguindo uma tendência mundial de redução da dependência do petróleo e dos seus derivados. Desta forma, também foram desenvolvidos esforços significativos de substituição dos sistemas energéticos fósseis, investindo nos aumentos da geração elétrica hidráulica, da produção de biodiesel, e dos usos de derivados da cana, como etanol carburante e bagaço para fins térmicos.

De acordo com dados divulgados pela (EPE, 2021), em contrapartida à majoritária produção energética mundial, o Brasil possui uma das matrizes energéticas mais limpas do mundo. No ano de 2018 o Brasil obteve uma produção energética com base renovável a um percentual de 45% de sua produção total, enquanto a produção referente ao restante do mundo foi de 14%. A comparação entre o potencial energético provindo de fontes renováveis brasileiros para o restante do mundo no ano de 2016 pode ser observada na Figura 2:

Figura 2 - Comparação entre o potencial energético provindo de fontes renováveis do Brasil versus mundo.



Fonte: EPE (2021).

Para o ano de 2019, somando lenha, carvão vegetal, energia hidráulica, derivados de cana e outras energias renováveis obteve-se um percentual de 46,2% da produção energética brasileira (EPE, 2021).

Energias renováveis consistem nos tipos energéticos provindos dos recursos naturais que são naturalmente reabastecidos, tendo como principais fontes a bioenergia (provindos de fontes biológicas) e as energias geotérmica, hídrica, oceânica, solar e eólica. Dentre as energias renováveis disponíveis, a energia solar é abundante, permanente, renovável e não prejudicial ao ecossistema. Em dados numéricos, a radiação solar anual que atinge o planeta Terra é equivalente a 7500 vezes o consumo mundial de energia total primária (Thirugnanasambandam e outros, 2010).

2.2 A questão da água

A água, além de apresentar-se como a substância mais comum no mundo, é considerada também um dos produtos mais nobres do planeta. Durante muito tempo a água não foi considerada como um bem econômico, hoje, a escassez de água de boa qualidade disponível no meio ambiente fez com que esse produto assumisse uma nova condição.

O acesso à água potável adequada, um direito humano básico, é um desafio particular, e esse desafio é agravado durante desastres naturais, como os terremotos e desastres ecológicos causados pelo homem, incluindo guerras, destruição de barragens e inundações repentinas. Durante as últimas duas décadas, a escassez de água potável e a deterioração da qualidade da água disponível se intensificaram e são consideradas como

sendo os mais significativos desafios de água no mundo. A falta de água limpa afeta os meios de subsistência das pessoas. Hoje, mais de um bilhão de pessoas em todo o mundo não têm acesso à água limpa e 3,4 milhões de pessoas - a maioria crianças - morrem a cada ano devido a doenças transmitidas pela água que poderiam ser evitadas (Aqlan e outros, 2021).

Uma das preocupações mais frequentes da população mundial está relacionada à questão da disponibilidade e obtenção de água potável. A classificação mundial das águas, feita com base nas suas características naturais, designa como “água doce” ou “água potável” aquela que apresenta o teor de sólidos totais dissolvidos inferior a mil mg/l (Rebouças e outros, 2006). Estima-se que apesar de 70% do planeta Terra ser coberto por água, apenas 3% dela é doce, sendo que, deste percentual 2% estão dispostas em forma de gelo ou subterrâneas, ou seja, sobram apenas 1% desta disponível para o consumo humano (Mallevalle e outros 1996).

Dados divulgados pelo Governo Federal Brasileiro (2021) comprovam que o Brasil é um país privilegiado, pois em sua extensão territorial possui 12% das reservas de água doce disponíveis em todo o mundo. Como resultado, de acordo com Rebouças e outros (2006), o Brasil destaca-se no cenário mundial pela grande descarga de água doce dos seus rios, cuja produção hídrica, 177.900 m³/s e mais 73.100 m³/s da Amazônia internacional, representa 53% da produção de água doce do continente sulamericano (334 mil m³/s), totalizando assim os 12% do total mundial (1.488 milhões de m³/s).

Somente a Bacia Amazônica concentra cerca de 70% desse volume. O restante deste número é distribuído de forma desigual para atender a toda população brasileira. O Nordeste, devido à má distribuição e às irregularidades das chuvas possui menos de 5% das reservas e grande parte da água disponível é subterrânea e com teor de sal acima do limite aceitável para o consumo humano, fazendo com que vários estados desta região vivenciem uma situação classificada pela Agência Nacional de Águas (ANA, 2006) como crítica.

De acordo com o Governo Federal Brasileiro (2014) os conflitos oriundos dos recursos hídricos brasileiros se acentuaram devido ao fato de quase totalidade da população brasileira (cerca de 90%) estar habitada em quatro grandes regiões que dispõe de aproximadamente 27% do total da disponibilidade hídrica do país. Essa constatação acentua-se ainda mais significativamente pelo fato de os mananciais das regiões sudeste e sul concentrarem mais de 56% da população, sendo fortemente impactados pelo lançamento dos despejos domésticos e industriais, dos quais somente 26% são submetidos

a algum tipo de tratamento, tornando assim mais conflituosa a questão da prioridade do uso dos recursos hídricos brasileiros.

Desta forma, dentre os desafios do setor relativo à disponibilidade de água potável, podem-se destacar: o crescimento acelerado da população, a exaustão das fontes de água tradicionais, a escassez da água originária das mudanças climáticas e o gerenciamento ineficiente dos recursos hídricos disponíveis (ANA, 2006). Resultante disto, de acordo com o relatório de Gerenciamento da água sob incerteza e risco publicado pela ONU (2012), quase metade da população mundial, cerca de 3,6 bilhões de pessoas – atualmente vive em áreas vulneráveis de escassez de água e a previsão é que quase 2 bilhões de pessoas possam sofrer escassez de água já em 2025.

Mancuso e Dos Santos (2002) afirmaram que em 2002 aproximadamente 65% de toda água consumida mundialmente era utilizada pela agricultura, 25% pela indústria e que os restantes 10% são encaminhados para diversos fins urbanos. Dessa forma, caso se obtenha uma redução de 10% na fração destinada à irrigação, haveria água suficiente para duplicar o consumo doméstico em âmbito mundial.

Assim sendo, para um usufruto correto da água potável faz-se necessário que os poderes públicos, tanto federal como o estadual realizem investimentos para um eficiente gerenciamento dos recursos hídricos, controlando e fiscalizando as condições de uso e proteção dos mesmos. Por sua vez, as empresas de saneamento básico devem fornecer, com eficiência, água de qualidade garantida, coletando e tratando os esgotos bem como recolhendo e dispendo de forma adequada o lixo. Por fim, a sociedade civil como um todo deverá então compreender que não será possível continuar com a filosofia de desperdício atual do uso de água potável, usando-o como se este recurso fosse ilimitado e de propriedade particular e individual (Rebouças e outros, 2006).

2.3 A água e a indústria da mineração

As atividades antropogênicas tais como a indústria e a mineração alteram fatores como a estética, a viabilidade econômica, segurança e saúde do local nas quais estão instaladas. Uma grande preocupação mundial está atribuída à degradação ambiental proveniente dessas atividades, incluindo danos diretos à vegetação, a cultura e a geração efluentes que podem alterar diretamente a qualidade das águas.

Desta forma, a infiltração e o efluente dos lixões da mina podem gerar grandes problemas ambientais e de saúde para os sistemas aquáticos. A segurança a longo e curto

prazo desses efeitos sobre a saúde de seres humanos e animais vivos depende das características físicas e químicas dos poluentes, bem como a exposição a essas águas poluídas. No Brasil, muitos rios e córregos estão totalmente poluídos devido às atividades antropocêntricas, como descargas industriais e de esgoto, as atividades minerárias, (Jonnalagadda e Mhere, 2001). Em contrapartida, a atividade minerária é de extrema necessidade para o desenvolvimento socioeconômico, principalmente do Brasil.

Dados divulgados pela ANA (2006) destacam que a atividade minerária é provavelmente, a principal usuária de água no Brasil. Isso ocorre, pois o sucesso de uma operação em mineração depende, em grande parte de sua interação com a água.

Para a efetivação do processo minerário é necessário um elevado consumo de água, além de ocasionar uma grande contaminação direta dos recursos hídricos, como por exemplo, o rebaixamento excessivo do lençol freático e comprometimento da recarga dos aquíferos, riscos de contaminação dos aquíferos e de águas superficiais devido à drenagem ácida. As mudanças de regimes ou contaminação dos recursos hídricos não se limitam à área da mina: podem atingir grandes distâncias e até comprometer uma bacia hidrográfica. Sendo assim, necessariamente, o empreendimento minerário destaca-se, dentre todos os outros setores industriais vigentes do país em consumo de água (ANA, 2006).

Dessa forma, o grande volume da sua significativa interação com os recursos hídricos superficiais e subterrâneos cria a necessidade de um olhar cuidadoso para com esta interação, considerando as características intrínsecas à atividade minerária, como a rigidez locacional e o caráter ainda insubstituível da grande maioria dos bens minerais para a manutenção da qualidade de vida da população, vis-à-vis à consideração de que a água é elemento indispensável à vida.

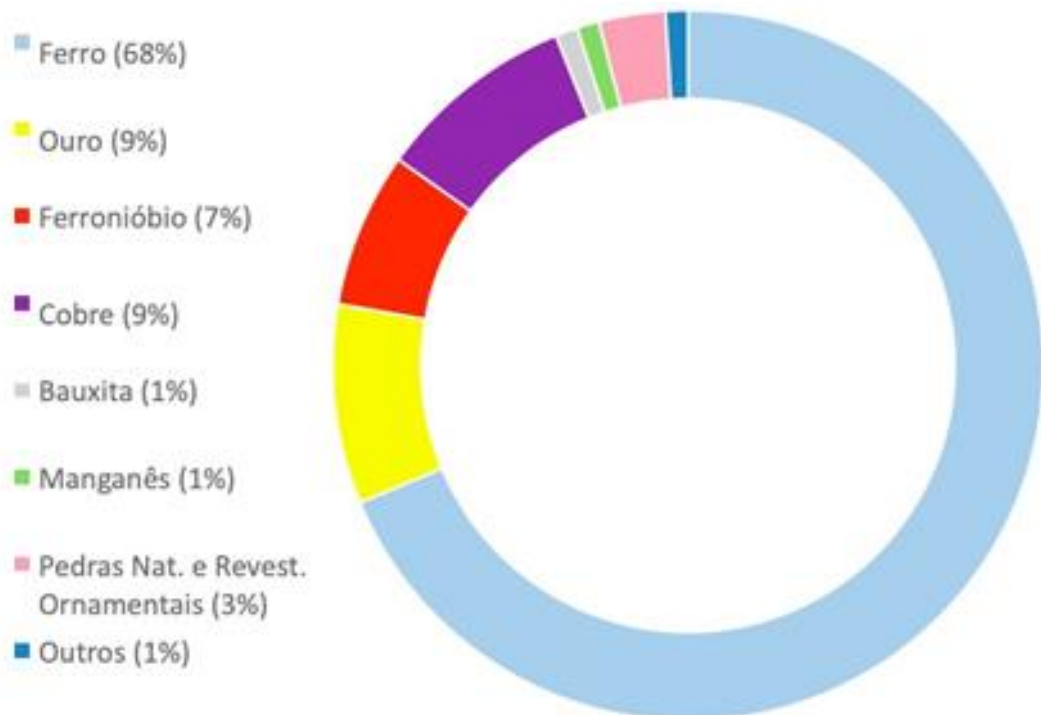
Em contrapartida, de acordo com o relatório anual do IBRAM (2019), referente a junho de 2018 até julho de 2019, a indústria extrativa mineral também tem participação fundamental no Produto Interno Bruto (PIB) e representa 1,4% de todo o PIB do Brasil, empregando cerca de 195 mil trabalhadores diretamente. Dessa forma, esta indústria é também uma importante fomentadora da indústria nacional, pois é o principal segmento fornecedor de matéria-prima para todos os tipos de indústrias existentes no país.

Ainda segundo o relatório anual do IBRAM (2019), o Produto Interno Bruto é formado predominantemente pelo setor de serviços, com 71,2% de seu total, seguido pelo setor industrial com 23,8% e por fim, pelo setor agropecuário com 5%. A indústria extrativa representa 3,7% de todo PIB brasileiro, sendo que a pauta dos bens minerais exportados

pelo Brasil no ano de 2018 atingiu um volume de 409 milhões de toneladas e representou, em dólares, um total estimado de US\$ FOB 29,9 bilhões.

Os principais produtos exportados foram: minério de ferro, ouro, nióbio, cobre, bauxita, manganês, pedras naturais e de revestimentos, caulim entre outros. O valor referente a cada uma dessas exportações é disposto na Figura 3:

Figura 3 - Exportações minerárias Brasileiras no ano de 2018



Fonte: IBRAM (2019).

A despeito da importância econômica e social, a continuidade e expansão das atividades de mineração no Brasil e no mundo dependem de forma crescente de um forte compromisso com a preservação e recuperação do meio ambiente, em especial no que se refere à água e aos recursos hídricos, e estes são, com frequência, um dos pontos de conflitos mais comuns entre mineração-sociedade.

De acordo com a ANA (2006), esses conflitos ocorrem devido à atividade da mineração ameaçam várias outras atividades econômicas, provocando grandes problemas ambientais como aqueles relacionados aos recursos hídricos, principalmente no que se refere à poluição das águas e à degradação de áreas sob exploração mineral.

Esses problemas ambientais se explicam pelo fato de que as atividades minerárias e de processamento mineral envolvem um grande número de etapas às quais estão associadas inúmeras possibilidades de contaminação da água e do meio ambiente como um todo. Sendo assim, todos os riscos ambientais devem ser avaliados durante o desenvolvimento do fluxograma de operação da usina, que deve prever as formas de gerenciamento e tratamento dos efluentes produzidos.

Assim como dito por Oliveira (2001), um dos principais problemas encontrados pela indústria de mineração é a necessidade cada vez mais elevada da utilização de fontes de águas primárias tornando-as impuras e com altos níveis de salinidade (incluindo sais de cálcio, magnésio e ferro como precipitados em potencial).

A partir do processo minerário, o nível de salinidade da água passa a extrapolar os limites aceitáveis para o consumo, limite este que, de acordo com a Organização Mundial de Saúde, contém sua permissividade de sal presente na água para consumo de 550ppm. Para fins de comparação, a água do mar normalmente tem um valor variável entre 3500 e 4500 ppm (Etawil e outros, 2009).

Para o caso de águas de minério, além do teor de sal ser superior aos limites aceitáveis, outros agentes dispostos nas pilhas de minério e de estéril, das barragens de decantação de finos e de rejeitos, assim como dos efluentes líquidos da mina ou das usinas de beneficiamento do minério, tornam essa água ainda mais imprópria para consumo humano. Uma iniciativa para minimizar essa situação de transformar essa água imprópria para o consumo em água potável é a instalação de equipamentos de dessalinização.

Ainda no processo minerário, para o seu funcionamento correto é necessário a obtenção das barragens de rejeito. As barragens de rejeitos estão entre as maiores estruturas geotécnicas terrestres construídas (Azam e Qirem, 2010) e são reconhecidas por gerarem grande impacto ambiental (Duarte, 2008; Laurino e outros, 2020).

Essas barragens são usadas para o depósito dos resíduos e água gerados a partir do processo de mineração (Lozano, 2006). Em um processo correto, funcionam como uma barreira que pode ser feita de solo compactado, blocos de rocha ou rejeito. Conforme são depositados, acomodam-se ao fundo, deixando a água na parte superior para então ser tratada e ter parte reutilizada para o processo de mineração, e parte ser devolvida ao meio ambiente (Bertolin, 2018; Laurino e outros, 2020).

De forma geral, rejeito é o material proveniente de beneficiamento do minério, do qual já foi retirada a parte economicamente importante (Machado, 2007). Por gerarem grande impacto ambiental e não possuírem um significativo valor comercial, as empresas optam

por descartar os rejeitos minerários da forma mais econômica, ou seja, como material para a construção da própria barragem, minimizando os impactos ambientais resultantes (Espósito, 2000; Laurino e outros, 2020).

No Brasil, algumas das barragens atendem as normas de segurança compatíveis com os padrões internacionais exigidos, entretanto muitas ainda permanecem sem a fiscalização necessária, o que faz com que estejam sujeitas à ultrapassagem de níveis de segurança, enchentes, entre outros fatores que podem resultar no rompimento da estrutura causando prejuízos ambientais, econômicos e sociais. Uma razão para essas falhas é o não seguimento dos critérios adequados de projeto, construção e operação. Historicamente, no Brasil essas falhas vêm custando vidas, além de todo impacto ambiental causado (Duarte, 2008; Laurino e outros, 2020).

2.4 Brumadinho, 25 de janeiro de 2019.

Apesar de a mineração ser um dos principais motores de aquecimento interno da economia do país e uma das responsáveis pelo saldo positivo da balança comercial desde o Brasil Colônia até os dias de hoje, a legislação do setor não acompanhou o aumento da produção e, conseqüentemente, o de acidentes. A barragem de rejeitos de minério de ferro da mina do Córrego de Feijão da VALE em Brumadinho, bem como a antiga mina em Mariana, dispunham de seu método construtivo a Montante, método que é o mais simples e também o menos seguro. Para este método são feitos degraus com o próprio rejeito sobre o dique inicial. Cada degrau acima do dique de partida é chamado de alteamento. Este é também o processo mais barato (Ragazzi e Rocha, 2019).

Ainda de acordo com Ragazzi e Rocha (2019), no ano de 2017, diferentemente dos laudos de estabilidade apresentados nos anos anteriores, a barragem 1 de rejeitos de Brumadinho tinha um Fator de Segurança para liquefação com condição não drenada de 1,06, fator bem abaixo do índice de 1,3 registrado nas medições anteriores e considerado o mínimo recomendável pela literatura mundial do setor. Pouca coisa foi feita para viabilizar o aumento do fator de segurança para barragem 1 em Brumadinho nos anos seguintes e, exatamente por isso, dois anos depois vieram a ocorrer os seguintes fatos:

“Sexta-feira, 25 de janeiro de 2019, mais precisamente às 12:28:25; inicia-se uma sequência inesperada e assombrosa. O topo do maciço da Barragem 1 (barragem que era uma das principais

estruturas do complexo da mina do Córrego do Feijão em Brumadinho, mesmo tendo se transformado nos últimos anos numa espécie de lixão inativo, ou seja, não recebia mais rejeitos de minério de ferro das minas do Feijão e Jangada desde julho de 2016) de grama verde-clara, começa a se rebaixar, a descolar do resto da superfície. É como se o chão estivesse desabando, abrindo um enorme cume daquela estrutura tapezóide.

Daí em diante até 12:38:36, o monte em ruína desmancha de forma geometricamente organizada. A terra desaparece, abrindo uma gigantesca cova retangular, como se fosse cortada com uma espátula de bolo. Nos segundo seguintes, na lateral desse paredão artificial, brotam imensas rachaduras no gramado. Elas estufam e estouram à medida que o cenário ao fundo vai se desintegrando. Há uma mecânica na tragédia. A paisagem sucumbe de maneira autofágica, segundo a segundo. O inicial verde-claro agora dá a vez a uma bruma intensa de pó de cor terrosa. Colapso.

12:28:40. Com a barragem agora implodida, os rejeitos são lançados para fora em alta velocidade e explodem em ondas sequenciais a cada novo obstáculo encontrado pela frente. Nos 16 segundos seguintes, um tsunami, equivalente a 4200 piscinas olímpicas de 50 metros de comprimento por 2 metros de profundidade, cheias de lama, avançam em direção à mina. Dessa forma ganha vida um lamaçal caudaloso formado por minério, areia e água, e engole a vegetação densa de forma devastadora estimado a mais de 108km/h. Assim, em menos de 30 segundos, a estrutura completa de uma Instalação de Tratamento de Minério (ITM) é completamente sitiada. O vídeo de segurança então é paralisado as 12:28:56, a marcha de uma das maiores tragédias da história do Brasil está em curso.

Na hora do rompimento, mais de 300 pessoas circulavam no local. Uma pousada de luxo e casas de comunidades pobres próximas, vizinhas ao complexo, também foram engolidas pela lama em menos de cinco minutos. Assim como em Mariana, em 9 de junho de 2016, a morte em Brumadinho chegou devastadora e silenciosa. Nenhuma sirene de alerta foi disparada.

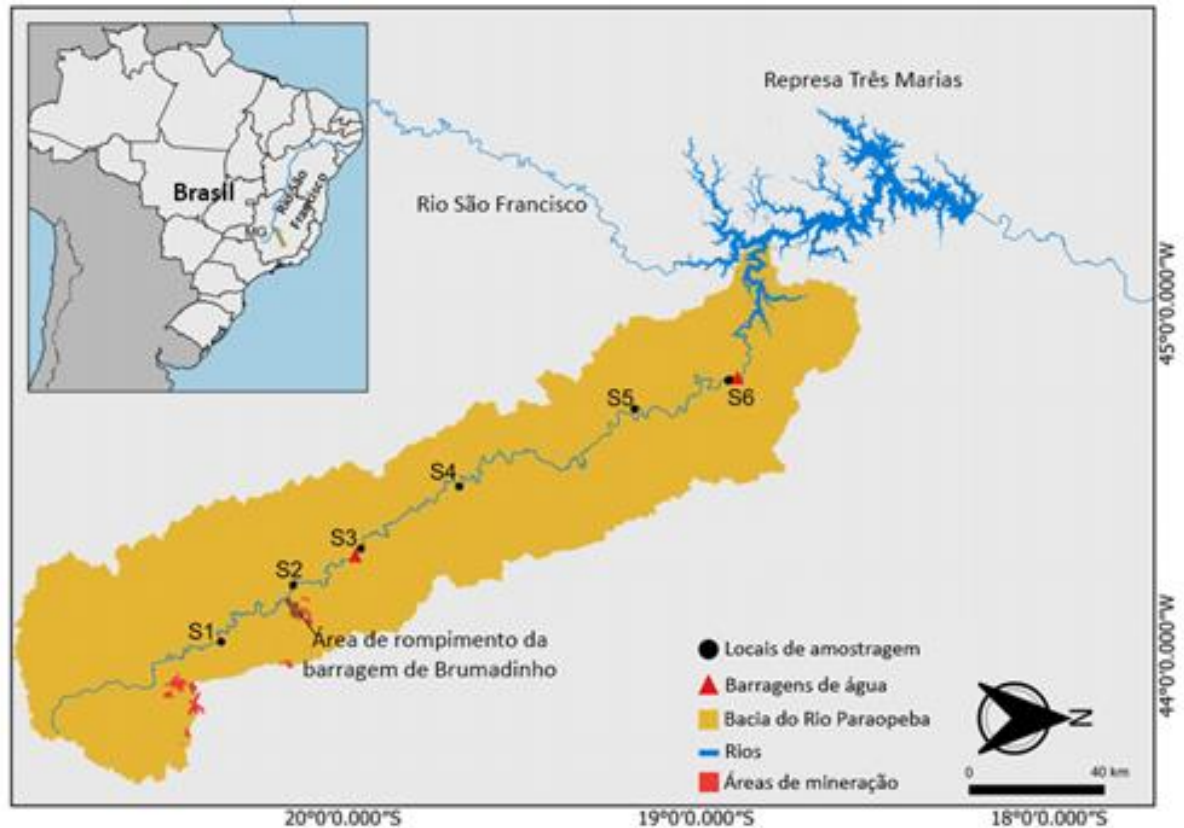
3 horas e 22 minutos depois, aproximadamente às 15:50 a lama após fazer todo seu caminho devastador ceifando vidas e natureza enfim chega ao rio Paraopeba, principal curso d'água da região e um dos mais importantes afluentes do rio São Francisco. Uma possível contaminação das águas do Velho Chico, o rio da integração nacional já era cogitada (Ragazzi e Rocha, 2019).”

Ainda hoje, mais de um ano depois até a presente data da publicação deste trabalho, a cidade de Brumadinho somam 270 mortos e 8 desaparecidos. A barragem 1 da mina do Córrego de Feijão se rompeu por liquefação, falha que, em tese, pode se dar por excesso de água ou de carga, exercendo uma força capaz de anular peso e a aderência das partículas do solo, deixando-as soltas.

Até o presente momento, as análises da Vale e do Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM) mostram que a pluma de sedimentos não atingiu o Rio São Francisco, como pode ser observado a partir da Figura 5 permanecendo no reservatório da Usina de

Retiro Baixo, na cidade de Pompéu, a exatos 315 km da barragem de Brumadinho (Ragazzi e Rocha, 2019).

Figura 4- Regiões de investigação da insalubridade da água do rio Paraopeba após o rompimento da Barragem 1 em Brumadinho, MG.



Fonte: Virgílio e outros (2020) e Souza e outros (2021) - adaptado.

A Figura 4 apresenta os estudos de Virgílio e outros (2020) e Souza e outros (2021). Nela são apresentados os pontos captados para amostragem das águas ao longo do Rio Paraopeba: (S1) Moeda - 61,3 km a montante da área de ruptura, (S2) Brumadinho - 5,2 km, (S3) Juatuba - 48 km, (S4) São José da Varginha - 111 m, (S5) Angueretá - 240km e (S6) Usina do Retiro Baixo, Pompéu - 302 km a jusante da área de rompimento da barragem. Sendo nesta última cidade (Pompéu), a última localização onde foram encontrados prováveis sedimentos do rompimento da barragem. Em todos estes pontos citados a água, após o rompimento da barragem, foi considerada salobra, não sendo permitida para o consumo humano.

De acordo com a Organização não governamental CONECTAS de Direitos Humanos foram despejados 12 milhões de metros cúbicos de rejeitos sobre o Rio Paraopeba e a

recuperação total dessas águas do rio bem como da flora e da fauna local podem demorar uma escala de tempo humana inestimável. (Conectas Direitos Humanos, 2020).

2.5 O processo de dessalinização

Agindo como uma iniciativa para a minimização da situação da poluição minerária sobre as águas do Rio Paraopeba e a fim de transformar essa água imprópria para o consumo em água potável, uma das vertentes que pode solucionar esta questão é a utilização dos processos de dessalinização.

Embora o termo seja normalmente aplicado a processos realizados pelo homem, a dessalinização é na verdade um processo natural, ininterrupto e uma parte essencial para o completo ciclo das águas. Dentro do ciclo natural das águas, as águas pluviais, além de fluírem para as nascentes, lagos e rios também fluem para o mar, se movendo ao longo e através de toda superfície terrestre. Em seu caminho natural para o mar, a água acumula minerais dissolvidos e outros materiais (muitas vezes provenientes da degradação do homem ao meio ambiente) tornando-a assim cada vez mais poluída e imprópria para o consumo. Por sua vez, a água que evapora através da energia do sol, deixa pra trás os sais e seus poluentes, tornando-se pura novamente, formando assim as nuvens que produzem chuva, e assim, completando o contínuo ciclo da água (Monteiro, 2016).

A ideia de separar o sal da água é bem antiga, datando da época em que o sal, e não a água era um bem precioso. À medida que as populações e as demandas por água doce se expandiram, no entanto, os empresários começaram a buscar maneiras de produzir água doce em locais remotos e, principalmente, em navios de guerra no mar (Cooley e outros, 2006).

Dessa forma, o processo de dessalinização em si surgiu há muitos anos com o objetivo de remover os sais da água, podendo então utilizar esse sal e tornando a água potável, própria para o consumo humano. Uma das primeiras referências à dessalinização foi feita ainda por Aristóteles, que descreveu o processo de destilação da água do mar no ano de 320aC.

De acordo com Freire e outros (2015), há evidências do uso do processo de dessalinização ainda durante o império greco-romano, onde os navegadores usavam a evaporação e condensação da água do mar para o próprio consumo em suas viagens, além de também usar filtros de barro como forma de reter o sal da água disponível.

De lá pra cá, pesquisadores, cientistas e empresas vêm fazendo experiências e

empregando diversos tipos de técnicas diferentes na busca por novas fontes de água doce ao redor do mundo (Henthorne, 2009).

Segundo a International Desalination Association (IDA, 2020), dados mensurados no ano de 2019 constataram que existem mais de 18000 instalações de dessalinização ativas no mundo, somando uma capacidade global de 89,91 milhões de m³/dia, fornecendo assim água potável a mais de 300 milhões de pessoas em todo o mundo, que dependem especificamente dessa água dessalinizada para algumas ou todas as suas necessidades diárias, em cerca de 180 países ao redor do globo.

Além disso, tecnologias de dessalinização também são utilizadas para tratar águas poluídas e como tratamentos avançados de águas residuais para a produção de água reciclada de alta qualidade, removendo componentes químicos, orgânicos e biológicos (Draper e outros, 2003).

No Brasil, os sistemas de dessalinização instalados se concentram na região do semiárido, devido aos longos períodos de seca, aliado à grande quantidade de reservatórios subterrâneos de água salobra (Nunes e outros, 2018).

Dados divulgados pelo Governo Federal Brasileiro no ano de 2020 relatam que no país (desde a implantação do maior programa de dessalinização vigente no país, sendo este o Programa Água Doce (PAD), que tem como objetivo a implantação dessalinizadores em áreas do semiárido nos poços tubulares contendo água salobra ou salina para serem usados como fonte de abastecimento - Programa água Doce: Documento Base, 2012), já estão em operação 830 sistemas de dessalinização com capacidade de levar água para 330 mil pessoas (Governo Federal Brasileiro, 2020).

De acordo com o jornal eletrônico Ambiente Brasil (2017), uma das alternativas futuras para a obtenção de água potável brasileira será a ampla viabilização do processo em larga escala de dessalinização das águas do mar. O custo varia conforme o equipamento instalado, o sistema de energia utilizado, o montante de água produzido e a forma de transporte até o cliente.

Atualmente, de acordo com o Governo Federal Brasileiro, (2020), ações relacionadas com o processo de dessalinização no país estão presentes em todos os estados da região Nordeste e em Minas Gerais. Ao todo, são 252 sistemas no Ceará, 93 na Paraíba, 29 em Sergipe, 30 no Piauí, 87 no Rio Grande do Norte, 75 em Alagoas e 264 na Bahia. Os estados de Minas Gerais e Maranhão estão na fase de diagnóstico. Pernambuco já contratou as obras de implantação dos sistemas. Para este ano, há a previsão de entrega de mais 55 sistemas de dessalinização.

Uma vez disponibilizado o amplo acesso a água potável para todo o país, torna-se importante salientar que o desenvolvimento econômico e a saúde individual geram mudanças nos padrões de vida da população, o que impacta diretamente o consumo de água, para mais ou para menos. A partir do PIB podem-se indicar diversos aspectos econômicos e sociais de um país ou localidade, inclusive a relação direta com o consumo de água (Nunes e outros, 2018). Segundo Dias e outros (2010), o consumo de água está diretamente associado ao valor do PIB, fator que pode ser comprovado uma vez que, países mais ricos apresentam maior consumo médio de água per capita.

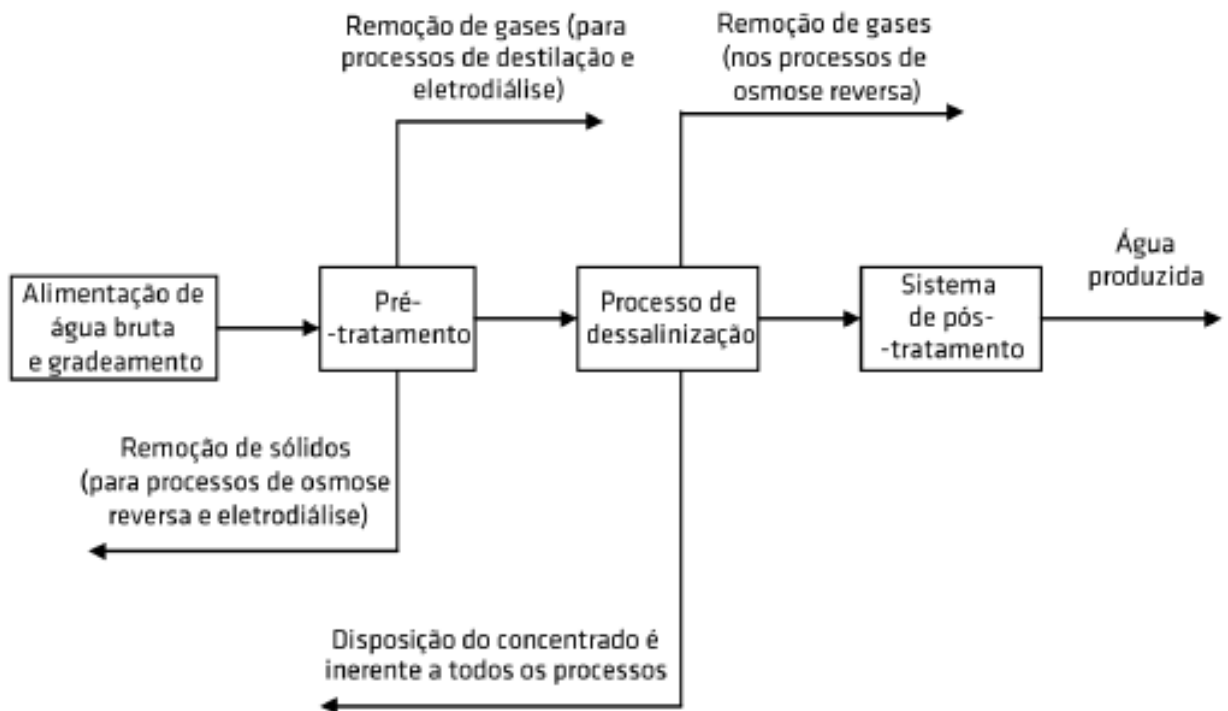
Não existe um único método ideal para os processos de dessalinização. Uma grande variedade de tecnologias efetivamente remove os sais da água salgada (ou extrai água doce da água salgada), produzindo um escoamento de água com uma baixa concentração de sal e outro com uma alta concentração de sais restantes (a salmoura ou concentrado). A maioria dessas tecnologias depende da destilação ou de membranas para separar os sais da água produzida (USAID 1980; Wangnick 1998 e 2002, Wangnick/GWI, 2005).

A seleção de um processo de dessalinização depende das condições específicas do local, incluindo o teor de sal da água, economia, qualidade da água necessária ao usuário final e experiência e habilidades locais de engenharia (Cooley e outros, 2006).

De forma geral, assim como explicado por Monteiro (2016), o processo de dessalinização envolve vários subprocessos e etapas de tratamento tendo como objetivo a remoção ou redução da concentração de sais e sólidos dissolvidos na água do mar ou salobra, a fim de se usá-la em nosso benefício ou consumo.

Dependendo da origem da água, as etapas e a tecnologia de dessalinização podem variar, alterando todo o sistema de tratamento, no entanto existem cinco fases chaves definidas em qualquer sistema de dessalinização como pode ser observado a partir do diagrama da Figura 5 (Silveira e outros, 2015):

Figura 5 – Diagrama de fases do processo de dessalinização



Fonte: Silveira e outros (2015).

O diagrama da Figura 5 agrupa o processo de dessalinização em quatro grupos principais. Nesse trabalho as chamaremos de fases, cada fase da dessalinização é descrita em seus pontos principais:

Fase 1 – Alimentação de água bruta e gradeamento: Basicamente esta fase consiste na extração da água em sua fonte de origem e a introdução dela no sistema. Para um melhor funcionamento e desempenho do tratamento como um todo, a fonte deve fornecer água em quantidade suficiente, com a melhor qualidade possível e com o mínimo de perturbação nos ecossistemas adjacentes.

Fase 2 - Pré-tratamento – Remoção de gases para processos de destilação e eletrodialise e remoção de sólidos para processos de osmose reversa e eletrodialise: Uma vez captada é necessário então se fazer a remoção de sólidos suspensos e controle do crescimento biológico, através de processos de tratamento da matéria orgânica. Nesta fase o pré-tratamento deve garantir que os compostos presentes na água não reduzam o

rendimento das unidades de dessalinização, tornando-se numa das etapas mais importantes para garantir otimização da linha de tratamento.

Fase 3 – Processo de dessalinização da água – remoção de gases no processo de osmose reversa e disposição do concentrado em todos os processos: É nesta fase onde se removem os sólidos dissolvidos, principalmente sais e outros constituintes inorgânicos. Para esta etapa podem ser utilizados processos térmicos acoplados a múltiplas possibilidades de tecnologias (solar, eólica, entre outras) bem como processos de tecnologia por membranas.

Fase 4 – Sistema de pós-tratamento: Nesta fase é feita a adição de produtos químicos e outros ajustes necessários de forma a tornar a água potável. Com isto as operações selecionadas para esta etapa divergem fundamentalmente em função da qualidade da água. Normalmente, as operações unitárias de pós-tratamento mais frequentes relacionam-se com a eliminação de micro-organismos e a diminuição do potencial corrosivo da água e podem envolver recuperação de alcalinidade, arejamento, desinfecção e estabilização. Em todos os casos é necessário se conhecer até que ponto é de fato necessário purificar a água.

É importante ressaltar que apesar de não ser propriamente uma fase do processo de dessalinização da água, a gestão do concentrado e de outros resíduos gerados nesse processo é de extrema importância. Para a finalização do processo como um todo é feita a deposição ou reutilização dos subprodutos e outros resíduos gerados (Cipollina e outros, 2009; Peinemann e outros, 2010; Silveira e outros, 2015; Monteiro, 2016).

Para este trabalho foi investigada a fase três desse processo: a dessalinização da água. Nos últimos anos diversos métodos de dessalinização vêm sendo estudados, dentre eles se destacam dois processos: os por membranas e por dessalinização térmica.

Quanto aos processos de dessalinização por membranas, se destacam como os principais os processos de osmose inversa e a eletrodialise.

Em linhas gerais define-se como osmose inversa o processo conduzido por eletricidade ou energia mecânica sob o qual a água a ser dessalinizada é colocada em alta pressão, passando então por membranas poliméricas, semipermeáveis que separam a água em duas correntes aquosas; uma rica e a outra pobre em sal.

Assim como explicado por Mathioulakis e outros (2007), a água passará através da membrana quando a pressão aplicada é maior que a pressão osmótica, restando dessa forma o sal. Como resultado, de um lado se obtém a água dessalinizada a partir de um

escoamento com baixa concentração de sal, e do outro uma salmoura concentrada que permanecerá no lado da alimentação.

Por sua vez, o processo que envolve a eletrodialise é um processo movido à eletricidade em que uma solução iônica é bombeada através de membranas de troca de ânions e cátions, dispostas em um padrão alternado entre um ânodo e um cátodo. Novamente de acordo com Mathioulakis e outros (2007), esse fenômeno resulta em uma concentração de íons em compartimentos (compartimento do concentrado ou salmoura), enquanto os outros compartimentos desse processo simultaneamente se esgotam (compartimento diluído).

Os processos de dessalinização térmica acionados primordialmente pelo calor, consistem na forma em que a água salgada é aquecida e evaporada, acumulando-se na parte interna de um tanque. Em outro compartimento, o vapor condensa e transforma-se novamente em água limpa.

De acordo com Moccock e outros (2019), a dessalinização térmica pode ser feita em junção a diversas outras tecnologias como por exemplo: a placa plana, os coletores solares, as chaminés solares e o tubo evacuado. Para essas tecnologias o processo de destilação térmica pode ocorrer em diversos formatos aos quais se pode listar: a destilação por múltiplos estágios (MSF), a destilação de múltiplos efeitos (MED), a destilação por compressão a vapor (VC) e a destilação solar (DS).

Nesse trabalho foi estudado o processo de dessalinização térmica feita em junção com a tecnologia das chaminés solares.

Ainda de acordo com Moccock e outros (2019), no processo de destilação solar a água a ser destilada passa a ser armazenada em tanques de material transparente. A luz solar atravessa o recipiente e dessa forma aquece a água até a sua evaporação. Ao condensar-se, a água já dessalinizada a partir da parte interna do material transparente escorre, sendo então recolhida em outro compartimento próprio.

Após o processo de dessalinização de água, partes dos solutos que foram obtidos por esse processo produzem um subproduto, uma água residual, também chamada de rejeito, de concentração salina muito maior do que a água salobra original e de um grande poder poluente para o solo, fauna e flora.

Em alguns locais, o rejeito chega a ser 60% do volume original quando comparado ao volume da água tratada tornando-se assim um dos maiores problemas ambientais encontrados para esse tipo de processo. O problema então passa a ser o local onde esse rejeito pode vir a ser descartado, uma vez que ele causa danos diretos ao meio ambiente

(Vale e Azevedo, 2013).

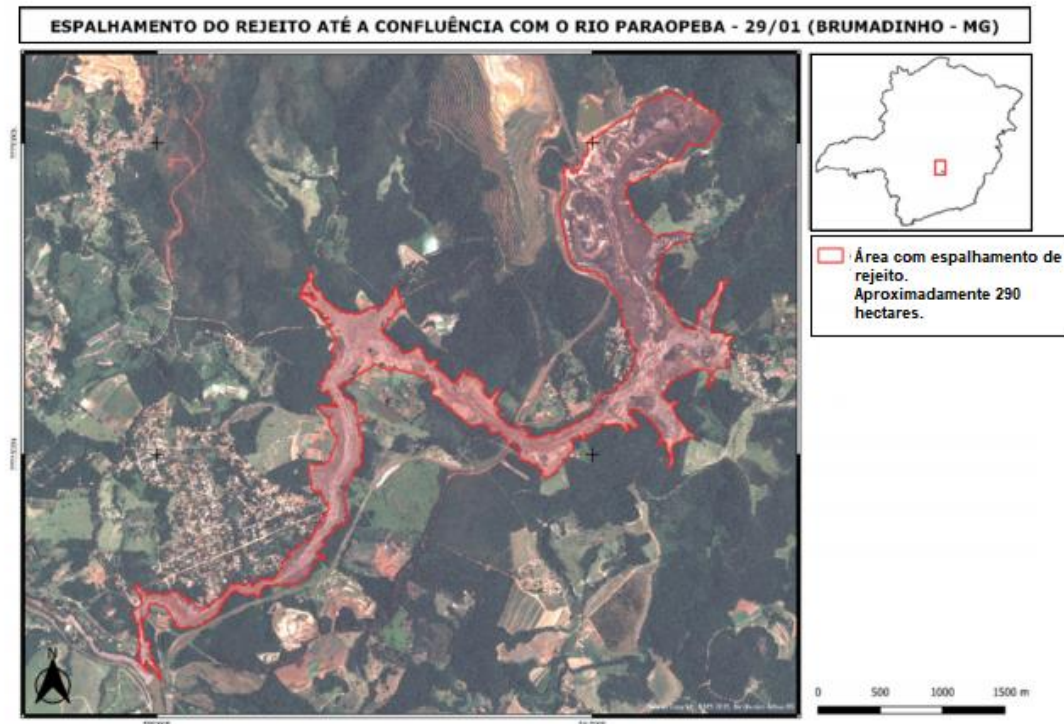
Partes dos rejeitos obtidos no processo de dessalinização dos países desenvolvidos são transportados para os oceanos, que apresentam grande poder de diluição, em outros casos são submetidos a poços isolados de grande profundidade (Anders e outros, 2013).

No Brasil, os rejeitos obtidos através da dessalinização de água salobra subterrânea, são, na sua maior parte, despejados diretamente no solo sem nenhum tipo de tratamento específico o que gera grandes riscos de provocar a desertificação do local (Porto e outros, 2001).

De acordo com Fernandes e outros (2016), como solução desse problema a nível nacional brasileiro, nos últimos anos grande parte do rejeito vem sendo reutilizado, em várias concentrações de salinidade, para a produção de mudas frutíferas e plantas halófilas de alta resistência em ambientes salinos, que funcionam como um dessalinizador biológico do solo (Vale e Azevedo 2013).

No caso estudado para este trabalho será tratada a dessalinização do Rio Paraopeba em Brumadinho, Minas Gerais. O rejeito deste rio consiste em 12 milhões de metros cúbicos de lama (Magris e outros, 2019) despejados em janeiro de 2019, o que projeta assim a elevação do transporte de sedimentos ao longo do tempo além da contaminação direta dos mananciais superficiais ao Rio São Francisco. A fauna e flora também foram atingidas, pois 51% da área atingida são ecossistemas naturais ricos em biodiversidade, dos quais mais de 65% (98,18 ha) eram matas em estado ecológico avançadas (Laurino e outros, 2020). O espalhamento do rejeito até a confluência do Rio Paraopeba no ano de 2019 pode ser observado a partir da Figura 6 feita pela Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável (SEMAD, 2019):

Figura 6 – Espalhamento do rejeito até a confluência com o rio Paraopeba



Fonte: SEMAD (2019).

Dessa forma, passa a existir uma emergencialidade para a dessalinização da água deste rio, o que foi o principal motivador deste trabalho. Segundo Laurino e outros (2020), médicos entrevistados pela BBC News Brasil alegaram a existência de 13 elementos químicos identificados na lama de rejeito no rio Paraopeba, entre eles estão o níquel, magnésio e cádmio que mesmo em quantidades pequenas podem ser extremamente prejudiciais à saúde. Por se tratar de uma barragem antiga pode vir a ser altamente tóxica e ainda não é possível medir a concentração atual destes componentes no solo.

Atualmente os rejeitos ainda chegam aos rios contaminando a fauna e a flora, afetando a cadeia alimentar, mas os resultados reais dessa contaminação só poderão ser percebidos daqui a décadas.

Em contrapartida a todas essas preocupações, uma vez dessalinizada, a água do rio Paraopeba se tornaria novamente potável. O rejeito mineralo extraído por sua vez vem sendo largamente estudado em casos de reaproveitamento do mesmo para a construção civil (Fernandes, 2005; Mendes, 2019; Laurino e outros, 2020).

Além destes aspectos negativos de acordo com Al-Kararaghoul e Kasmerski (2013),

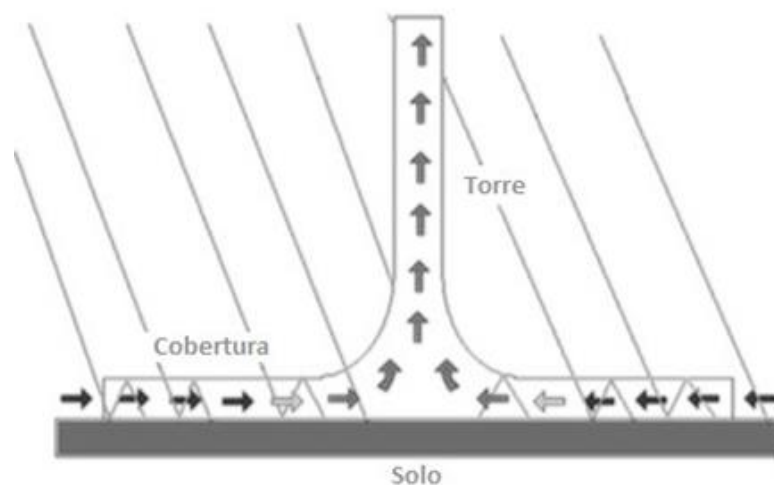
todos os processos de dessalinização geram um impacto negativo a mais de grande destaque, devido ao fator de o ambiente necessário para este processo consumir muita energia. Para a resolução deste problema em específico, o uso de energia renovável superaria este inconveniente.

2.6 Chaminés solares

Uma das tecnologias utilizadas para aproveitar a energia proveniente do sol é a chaminé solar. Seu funcionamento se baseia na combinação de três dispositivos distintos: coletores solares, torres e turbinas. De maneira resumida: no período diurno, parte da radiação solar incidente durante o dia atravessa a cobertura transparente da chaminé, promovendo assim o aquecimento do solo. Uma vez aquecido, o solo por convecção natural transfere calor para massa de ar no interior do coletor.

A massa de ar então escoar em direção à torre devido às forças de empuxo provenientes dos gradientes de temperatura no interior do dispositivo. Ao encontrar a torre o ar aquecido é então succionado para o exterior do dispositivo (Castro Silva e outros, 2015). No período noturno, quando a incidência solar é cessada, o solo ao inferior da chaminé, que durante o dia armazenou parte da incidência solar passa a funcionar como efeito estufa, liberando então o calor armazenado e gerando um escoamento quase que contínuo de funcionamento, porém, em menores proporções. A Figura 7 refere-se ao comportamento do ar no interior de uma chaminé solar:

Figura 7 – Comportamento do ar no interior da chaminé solar.



Fonte: (Maia e outros, adaptado, 2019).

Cabaynes, em 1903, definiu o conceito de chaminé solar. Porém, apenas em 1968 o alemão Jörg Schlaich descreveu novamente os ideais de Cabaynes tornando tal conceito possível ao uso. Dessa forma, em 1981 o governo alemão, em parceria com a Unión Fenosa, promoveu e financiou a execução do primeiro protótipo de chaminé solar (Bernardes e outros, 2003).

O primeiro protótipo experimental de chaminé solar feito no mundo, foi construído em Manzanares na Espanha, protótipo que pode ser visto a partir da Figura 8 subitem (a), no ano de 1981. De acordo com Schlaich e outros (2005), a chaminé possuía uma altura da torre equivalente a 194,6m, um diâmetro de 5,08m e 0,00125m de espessura da parede metálica. Em relação ao coletor, os dados equivalentes são de 122m de raio com uma cobertura de vidro e estrutura de teto feita em PVC. O sistema de turbinas da chaminé era feito com rotor único equipado com quatro lâminas de 5m na base da chaminé (Kasaeian e outros, 2016).

A Figura 8 ilustra os seguintes parâmetros da chaminé solar de Manzanares: (a) o protótipo da chaminé solar feito em Manzanares na Espanha, (b) a vista do interior do coletor do protótipo de Manzanares e (c) a turbina utilizada no protótipo.

Figura 8 – O protótipo de chaminé solar executado em Manzanares, Espanha.



Fonte: (Schlaich e outros, adaptado, p. 3-4, 2005).

Este protótipo operou entre 1982 até 1989, com uma potência máxima de funcionamento de 50kW. A eletricidade gerada mesmo foi integrada à rede elétrica local. Embora não tenha sido alcançada a potência máxima prevista no projeto, a planta operou com sucesso durante sete anos, provando que o conceito é tecnicamente sólido (Petrorius, 2007).

Dentre as possibilidades de se trabalhar com o escoamento de ar quente gerado por este dispositivo existe a possibilidade de utilizá-lo para a alimentação de turbinas eólicas (Fathi e outros, 2016; Kasaeian e outros, 2016; Schlaich e outros, 2005). Dentre os principais estudos disponíveis na literatura para a utilização de chaminés solares e obtenção de energia elétrica pode se destacar os autores: Haaf e outros (1983), El-Haoun (2002), Eltawil (2009), Zuo e outros (2011), Zuo e outros (2012), Maia e outros (2013), Fathi e outros (2016), Alkaisi e outros (2017), Zuo e outros (2018), Zuo e outros (2019) e Abdelsalam e outros (2020).

Grandes áreas são necessárias na construção de chaminés solares para gerar energia a preços competitivos (Maia e outros, 2009), sendo assim o fator custo inicial de projeto é um grande empecilho para a larga implementação dessa tecnologia.

Em contrapartida a esta desvantagem, a partir dos estudos de: Schlaich (1995), Trieb e outros (1997), Petrorius (2007), Herrman (2016) e Zhou e outros (2015), podem se destacar as seguintes vantagens para a utilização de chaminés solares:

- Os materiais de construção primordial da planta (baseado em vidro e concreto) são relativamente baratos e largamente disponíveis;
- Em locais de planta adequados, como áreas desérticas, a radiação solar é uma entrada muito confiável e largamente disponível de fonte de energia. Consequentemente, a energia produzida por usinas de energia solar nesses locais passam a produzir grandes picos de energia, o que nem sempre ocorre com esquemas como a geração de energia eólica, sendo assim considerada amplamente estável;
- As usinas de chaminé solar utilizam também da radiação solar difusa. Portanto, embora em proporções reduzidas, a usina ainda gera energia em condições nubladas;
- A planta pode ter uma longa vida operacional (estimada entre 80 a 100 anos);
- A planta não requer nenhum tipo de combustível não renovável para operar, assim não produz quaisquer emissões. Isso também significa que a planta nunca teria que lidar com custos crescentes de combustível, bem como com as implicações atuais do despejo de carbono para a atmosfera;

- As usinas de chaminé solar não precisam de água de resfriamento;
- A planta de forma geral opera com tecnologia simples (exceto possivelmente pelo turbo-gerador), o que facilita a possibilidade de mão de obra atuante na mesma, sendo assim, a tecnologia necessária a uma chaminé solar não ficará desatualizada facilmente;
- Baixo custo de manutenção;
- O solo sob o coletor de uma de chaminé solar atua como um mecanismo de armazenamento natural de energia isso significa que, embora em proporções bastante reduzidas, a planta continua gerando energia à noite.

Ainda de acordo com os estudos de Schlaich (1995), Trieb e outros (1997), Petrorius (2007), Herrman (2016) e Zhou e outros (2015), a chaminé solar por sua vez, apresenta como desvantagens os seguintes tópicos:

- Por depender majoritariamente da energia solar, a potência de saída não é constante ao longo do dia ou a mesma em todos os períodos do ano. Durante o dia os horários de geração de pico não coincidem com os horários de demanda de pico (considerando os horários de demanda energética altos de manhã logo cedo e a noite), sendo assim, acaba necessitando de alguma fonte suplementar em determinados horários específicos. Em adição a este, a produção energética atinge seu pico em épocas de baixa demanda de eletricidade (no verão). A geração de energia também é muito menor nos meses mais frios do ano, quando a demanda por eletricidade é bem mais alta;
- Para serem economicamente viáveis, as chaminés solares devem ser construídas em um escala muito grande. Sendo assim, devido às suas grandes proporções de tamanho, o custo de capital inicial dessa planta é alto;
- A construção da instalação inicialmente requer grandes quantidades de materiais. Tais quantidades podem causar problemas logísticos quanto à disponibilidade e transporte para as áreas escolhidas de instalação;
- Somado a estas desvantagens e limitações também é possível destacar devido às restrições tecnológicas da utilização do concreto armado, as proporções para o tamanho necessário da altura da torre é limitada;
- Preocupações ambientais também são destacadas, uma vez que, além de alterar a geometria local a chaminé solar também traz consequências para espécies de plantas e animais, como os pássaros por exemplo.

Uma das principais desvantagens do processo é que a eficiência de uma chaminé solar para geração elétrica é pequena. Dessa forma, pode-se potencializar o uso da energia solar combinando a geração elétrica com outras tecnologias. Como exemplos disponíveis na literatura destaca-se a combinação de chaminés solares com energia geotérmica, com energia eólica, acoplada a painéis fotovoltaicos, aproveitando do escoamento de calor gerado em seu interior para secagem de alimentos, bem como utilizando desse mesmo escoamento de calor para a dessalinização de águas salobras.

Nesse trabalho, foi estudado o uso de uma chaminé solar combinada para a geração de energia elétrica e obtenção da dessalinização de águas salobras.

2.7 Chaminés solares para Dessalinização

A atual crise na disponibilidade em larga escala de água potável combinada com a ampla necessidade atual da demanda energética em todo o mundo são dois dos problemas mais urgentes enfrentados atualmente. O uso de energia solar para dessalinização das águas salobras e dos mares através da construção de chaminés solares para dessalinização é uma tecnologia disponível para enfrentar esses problemas (Yosif, 2014; Zou e outros, 2012).

Uma chaminé solar para dessalinização de águas salobras basicamente pode ser composta por: uma cobertura circular transparente elevada a certa altitude do solo (coletor solar), uma torre circular em seu centro (chaminé solar propriamente dita), uma turbina de ar e um condensador de alta eficiência (Wang e outros, 2006).

O uso de energia solar na destilação de água salobra é um processo de dessalinização térmica que é chamado de destilação solar. Um destilador solar é um dispositivo solar que visa o aprisionamento da água (do mar ou salobra) evaporada condensando-a em uma tampa de baixa temperatura e destilando-a. Dessa forma, a construção de um destilador solar pode ser feita de vários tamanhos, obtendo para cada um diferentes volumes de água dessalinizada.

Em linhas gerais, no destilador solar, o calor latente do vapor d'água condensado é transferido diretamente para o ar frio, que por sua vez faz com que o vapor seja condensado em uma tampa de vidro. A produtividade da água doce está alinhada diretamente a este processo.

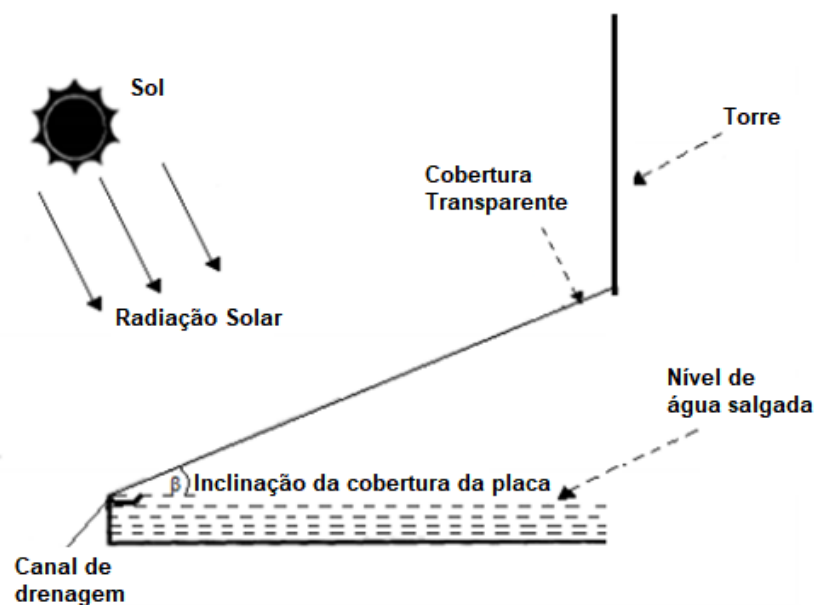
Caso o calor latente utilizado para o ar frio seja aumentado, maior será a produtividade de água doce. Isso também causa o incremento na temperatura da água (do

mar ou salobra) e aumento na produção de água doce.

Este controle da perda de calor ajuda o sistema a controlar o calor latente da condensação e, quando reutilizado, melhora tanto a eficiência de aproveitamento da energia solar quanto a produtividade da água (Cooper, 1969).

A Figura 9 mostra um esquema de chaminé solar simples agindo como um destilador solar direto:

Figura 9: Esquema de uma chaminé solar com um destilador solar direto.



Fonte: (Al-Ismaly e Probert, 1990 e Campos, 2017 - adaptado).

Para a chaminé solar feita por destilador solar direto existe uma base ou tanque contendo um volume de água salgada ou salobra coberto com uma superfície inclinada transparente, como mostrado na Figura 10. Quando a radiação solar atravessa essa superfície, aquece a água e eleva a taxa de evaporação. O vapor de água formado, ao encontrar com a superfície fria, tende a condensar, tornando possível a captura da água limpa, e deixa para trás sais minerais, particulados e microrganismos nocivos. (Biswas e Ruby, 2012).

A eficiência desse processo é avaliada em função dos parâmetros que influenciam a transmissão da radiação, a taxa de evaporação da água e de condensação. Esses parâmetros vão desde formato e dimensões do tanque até os materiais de recobrimento (Campos e outros, 2019). Além desses parâmetros, fatores como a radiação solar incidente,

têm grande influência para esse tipo de chaminé.

De acordo com Campos e outros (2019) e Silva e outros (2014), observa-se pequena produção nas primeiras horas do dia, que tende a aumentar à medida que a incidência de radiação vai chegando ao ponto máximo, isto é, entre meio-dia e três horas da tarde e, então, começa a cair com o anoitecer.

Durante a noite, ocorre ainda cerca de 30% da produção total, já que as temperaturas vão abaixando e a condensação no vidro é favorecida (Silva e outros, 2014).

Dessa forma, estudos de Campos e outros (2019) mostraram que a tecnologia do dessalinizador solar direto apresenta pontos positivos que devem ser explorados e pontos negativos que precisam ser controlados. Os custos com transporte de água são reduzidos, uma vez que a produção ocorre no consumidor. Entretanto, eles requerem grandes áreas para instalação, pois a razão produtividade por área é baixa e (Kudish e outros, 1982).

Fluri e outros (2009) compararam os modelos de custo recém-desenvolvidos de chaminé solar de grande porte com os anteriores a partir de uma planta de referência. Modelos de custo foram apresentados para os principais componentes de uma chaminé solar, ou seja, o coletor, a chaminé e a unidade de conversão de energia. Os resultados dos trabalhos mostraram que os modelos anteriores poderiam ter subestimado o custo inicial e o custo de eletricidade nivelado para uma chaminé solar de grande porte. Por sua vez, os créditos de carbono reduziram significativamente o custo da eletricidade para tal planta. O impacto dos créditos de carbono no custo da eletricidade foi investigado.

Zou e outros (2011) investigaram e desenvolveram dois métodos matemáticos para um escoamento unidimensional do sistema de dessalinização solar por meio de chaminés solares. Nesse estudo os autores investigaram o quão vantajoso é para a eficiência do sistema se ter água no lugar do solo comum para chaminés solares de grande porte. De acordo com a análise teórica, o sistema integrado pode melhorar drasticamente a eficiência de utilização da energia solar obtida a partir da chaminé. As vantagens ecológicas, sociais e econômicas também foram consideradas significativas. O sistema integrado estudado foi considerado ideal para desenvolvimento no noroeste da China.

Zou e outros (2012) propuseram uma chaminé solar com sistema de dessalinização de água do mar como um modelo de protótipo para o sistema integrado experimental. Seu desempenho e eficácia foram examinados em condições climáticas reais. Os resultados experimentais foram considerados satisfatórios e competitivos quanto ao que se referem à produção simultânea multi-direcionada que pode ser alcançada, como água potável e energia elétrica.

Yosif (2014) fez o desenvolvimento de um método alternativo de extração de calor e umidade da água do mar a partir de um sistema de chaminé solar para geração de energia e dessalinização da água. Neste sistema Yosif investigou o funcionamento a partir de um condensador de alta eficiência com o objetivo de estimar seu desempenho economicamente. Obtendo como dados de entrada a cidade de Dalian, China, os resultados finais indicaram que o preço da água da rede integrada a central elétrica é favorável com a faixa de preço da água doce produzida por fornecimento de energia convencional e pelo fornecimento de energia eólica. Dessa forma comprovou-se que a chaminé solar para dessalinização melhoraria significativamente a eficiência da utilização da energia solar para obtenção de energia.

Hammadi (2016) realizou uma modelagem matemática um estudo de uma chaminé solar integrada com um sistema de dessalinização de água do mar. Toda modelagem matemática foi baseado na conservação da massa e energia. Com este comprovou-se que um sistema integrado solar chaminé solar para obtenção de energia e dessalinização dispõe de excelentes resultados para ambas as funcionalidades. A análise foi realizada para as estações: verão e inverno em uma latitude de 30°N. A espessura da camada de água obteve um efeito significativo sobre a produtividade da água dessalinizada enquanto as dimensões da chaminé solar e o coletor solar obtiveram um efeito menor.

Ming e outros (2017) investigaram numericamente o desempenho da dessalinização de uma chaminé solar com a mesma dimensão da planta piloto de Manzanares. Um modelo de transferência de calor foi desenvolvido, descrevendo o processo de resfriamento do ar ao longo da chaminé e a condensação associada. Na planta estudada, ao invés da instalação da turbina, gotículas de água foram pulverizadas para evaporação no fundo da chaminé, assim o escoamento de ar foi submetido à umidificação. Os resultados mostraram que com o aumento da fração de massa de água no ar, a influência do microclima no ambiente local também aumentou. A evaporação das gotas aumenta a umidade relativa do ar dentro da chaminé, assim o nível de condensação do sistema reduz em mesma proporcionalidade. Além disso, a produção de água doce aumenta com o aumento da quantidade de água pulverizada, o que é benéfico para a melhoria da eficiência de dessalinização do sistema.

Zuo e outros (2018) baseiam-se em uma modelagem matemática para uma chaminé solar superalimentada por turbinas eólicas combinada com dessalinização de água do mar. Neste estudo foram analisadas por meio de simulação numérica tridimensional o seu completo e melhor funcionamento. Os resultados mostraram que o aumento do número de pás da turbina levou a uma redução da produtividade de água doce. Além disso, o aumento

do ângulo de instalação das pás, a produtividade de água doce e a potência do eixo da turbina aumentaram conforme a folga radial das lâminas da turbina também aumentava, à medida que a produtividade de água doce do sistema aumentava e o ruído produzido pelo mesmo diminuía. Por fim, foi comprovado que a potência do eixo da turbina exerce um valor máximo quando a folga radial relativa é 2%.

Kiwan e outros (2018) desenvolveram uma modelagem matemática nova para uma planta de destilação de água por chaminé solar a ser proposta e estudada. Esta chaminé gerou eletricidade e produziu água destilada por evaporação direta usando uma mesma geometria de uma chaminé solar convencional. A novidade do sistema proposto foi a utilização da chaminé solar para evaporação direta da água e extração da energia da corrente de ar úmido. Os efeitos de vários parâmetros operacionais e geométricos no desempenho do sistema foram estudados e documentados. Esses parâmetros incluíram a área e a profundidade da água a ser dessalinizada em sua seção geométrica, o tipo de material do coletor e a altura do coletor na entrada da chaminé. Em geral, os resultados mostraram que o sistema proposto pode melhorar a eficiência de utilização da chaminé solar em mais de 100 quando comparada ao sistema convencional. Os resultados também mostraram que em uma altura de água fixa, o aumento da área de superfície da piscina reduz a eficiência do sistema, dessa forma há uma altura de água ideal para qual a eficiência do sistema se torna máxima.

Maia e outros (2019) através de uma extensa revisão bibliográfica estudaram cada tipo de tecnologia relacionada com a dessalinização de água a partir de chaminés solares. A partir deste estudo foi relatado que ainda existem poucos estudos disponíveis para o uso de chaminés solares para dessalinização, mas em sua grande maioria os resultados demonstram ser promissores. A maioria dos estudos disponíveis na literatura concentra-se em simulações numéricas, avaliando diversas possibilidades para aumentar o desempenho geral e a eficiência de utilização da energia solar. Nenhuma configuração de dessalinização de chaminé híbrida ainda se mostrou a escolha óbvia, dessa forma mais estudos são necessários.

Mendez e Bicer (2020) analisaram numericamente a viabilidade de implantação de uma chaminé solar para produção de energia elétrica e obtenção de água doce. Dessa forma foi feito um estudo preliminar com base na literatura em que, uma dessalinização térmica da água do mar foi incorporada com a ideia de aumentar a eficiência geral da chaminé solar, a fim de atender à demanda de eletricidade e água doce sem interrupção. Para isso um sistema de armazenamento hidráulico com turbina foi integrado. Como resultado,

implementando um sistema integrado com uma chaminé solar como principal fonte de energia, a eficiência energética global obteve o resultado de 8,4%, o que é substancialmente superior ao de uma única chaminé solar comum.

Abdelsalam e outros (2020) através de simulações matemáticas apresentaram a viabilidade técnica e econômica para uma instalação de uma chaminé solar para dessalinização de água no porto de Aqaba na Jordânia. Os resultados deste estudo mostraram que o desenvolvimento de uma usina de destilação por chaminé solar no porto de Aqaba é viável. Em termos numéricos a usina seria capaz de produzir cerca de 481.440 kWh de eletricidade e 123.753 toneladas de água destilada anualmente. Os resultados também mostraram um valor final de custo de 1,86 / kWh na produção desta energia, valor este economicamente viável para esta região.

Há uma base de literatura relativamente grande para a dessalinização de água por meios de energias renováveis, incluindo detalhes sobre a operação e confiabilidade de várias operações movidas tanto exclusivamente por energia solar como por energia solar e eólica. No entanto, na consideração da energia solar das chaminés para dessalinização ainda estão em seu início de estudo se mostrando como uma tecnologia promissora, entretanto, mais estudos ainda são necessários (Maia e outros, 2019).

Diversos estudos sobre a dessalinização de águas salobras feitas por chaminé solar foram minimamente analisados para a construção deste trabalho, dentre esses podem-se destacar os estudos de Wang e outros (2006), Zhu e outros (2006), Zhou e outros (2010), Zuo e outros (2012), Yosif (2014), Ho e outros (2016), Ming e outros (2017), Asayesh e outros (2017), Kiwan e outros (2018), Zuo e outros (2019), Abdelsalam e outros (2020), Zuo e outros (2021), entre outros.

2.8 Estado da Arte

Com base na literatura estudada, vários pesquisadores exploraram o desempenho e a viabilidade de chaminé solares para dessalinização. A Tabela 1 apresenta um resumo do estado da arte destacando os trabalhos que foram utilizados como suporte no trabalho desenvolvido, trabalhos que apresentam seu foco especificamente na avaliação da planta e viabilidade econômica, realizando estudos computacionais e experimentais:

Tabela 1 – Estado da arte do estudo de chaminés solares para dessalinização

Foco do Estudo	Resumo dos principais resultados	Referências
Comparação de custos gerais do projeto.	Comprovações que os modelos anteriores podem ter subestimado o custo inicial e o custo de eletricidade nivelado de uma usina de grande escala de chaminé solar. Também foi mostrado que os créditos de carbono reduzem significativamente o custo da eletricidade para essa planta.	Fluri e outros (2009)
Realização de experimentos em uma planta de teste de chaminé solar construída em Belo Horizonte, Brasil, a fim de avaliar seus parâmetros durante o período de um ano.	O comportamento do escoamento de ar foi definido e as propriedades ópticas dos materiais utilizados foram determinados. Experimentos de secagem de vários produtos agrícolas foram realizados e comparados com a secagem ao sol. Observou-se que, comparando aos produtos secos diretamente pelo sol a chaminé atingiu o teor de umidade desejado em tempos menores. Além disso, a qualidade final dos produtos era bastante superior. A chaminé solar pode ser utilizada de forma satisfatória como secador solar.	Maia e outros (2009)

Tabela 1– Estado da arte do estudo de chaminés solares para dessalinização

Foco do Estudo	Resumo dos principais resultados	Referências
Integração de modelo e protótipo para um sistema experimental.	Os resultados experimentais foram considerados satisfatórios e competitivos quanto ao que refere à produção simultânea multi-direcionada que pode ser alcançada, como água potável e energia elétrica.	Zou e outros (2012)
Desenvolvimento de um método alternativo de extração de calor e umidade da água do mar feita por chaminé solar para dessalinização.	O preço da água da rede integrada à central elétrica é favorável a faixa de preço da água doce produzida por fornecimento de energia convencional e pelo fornecimento de energia eólica. Dessa forma, a usina de destilação de água por chaminé solar melhoraria significativamente a eficiência da utilização da energia solar para obtenção de energia.	Yosif (2014)
Modelagem e otimização de uma chaminé solar de pequeno porte para a secagem de produtos agrícolas.	Os resultados comprovaram que há um grande potencial de exergia a ser aproveitado e que os parâmetros mais importantes para a determinação da configuração de um sistema real são o diâmetro da torre e do coletor e a altura da torre.	Castro Silva (2014)
Nova abordagem de modelamento matemático para chaminé solar de dessalinização.	O sistema integrado de chaminé solar para dessalinização pode alcançar excelentes resultados para as suas duas principais funcionalidades. A análise foi realizada para ambas as estações: verão e inverno a partir de uma latitude de 30°N. Foi notado que, a espessura da camada de água tem um efeito significativo sobre a produtividade da água enquanto as dimensões da chaminé solar e o coletor solar têm um efeito menor.	Hammadi (2016)

Tabela 1 – Estado da arte do estudo de chaminés solares para dessalinização

Foco do Estudo	Resumo dos principais resultados	Referências
<p>Comparação do desempenho para uma de planta de dessalinização com o mesmo tamanho do modelo de Manzanares.</p>	<p>O aumento da fração de massa de água no ar, a influência do microclima no ambiente local também foram afetados. Além disso, a produção de água doce aumenta com o aumento da quantidade de água pulverizada, o que é benéfico para a melhoria da eficiência de dessalinização do sistema.</p>	<p>Ming e outros (2017)</p>
<p>Simulação numérica para um melhor funcionamento de uma chaminé solar para dessalinização superalimentada por turbinas eólicas.</p>	<p>O aumento do nº de pás da turbina leva a uma redução da produtividade de água doce, e a velocidade de rotação correspondente à potência máxima do eixo da turbina muda na direção de menor velocidade. A potência do eixo da turbina tem um valor máximo quando a folga radial relativa é 2%.</p>	<p>Zuo e outros (2018)</p>
<p>Determinação a influência dos parâmetros geométricos no desempenho do sistema de uma chaminé de pequena dimensão.</p>	<p>Os resultados apresentados para diferentes configurações de chaminés solares indicaram que os parâmetros mais influentes sobre a vazão mássica são o diâmetro e a altura da torre. O fator mais influente sobre a temperatura de saída do escoamento foi o diâmetro do coletor. Modelos da literatura foram utilizados para avaliar a eficiência energética e exergetica deste dispositivo para as geometrias definidas.</p>	<p>Castro Silva (2018)</p>

Tabela 1– Estado da arte do estudo de chaminés solares para dessalinização

Foco do Estudo	Resumo dos principais resultados	Referências
<p>Modelagem matemática de uma nova planta de chaminé solar para dessalinização.</p>	<p>O sistema proposto pode melhorar a eficiência de utilização da chaminé solar em mais de 100 vezes do que o sistema convencional. Em uma altura de água fixa, o aumento da área de superfície da piscina reduz a eficiência do sistema, enquanto há uma altura de água ideal na qual a eficiência do sistema é máxima.</p>	<p>Kiwan e outros (2018)</p>
<p>Revisão bibliográfica do que já foram estudados para dessalinização de água feita por chaminés solares.</p>	<p>Ainda existem poucos estudos relatando o uso de chaminés solares para dessalinização, mas esses resultados são promissores. A maioria dos estudos disponíveis na literatura concentra-se em simulações numéricas, avaliando diversas possibilidades para aumentar o desempenho geral e a eficiência de utilização da energia solar. Nenhuma configuração de dessalinização de chaminé híbrida ainda se mostrou a escolha óbvia, e mais estudos são necessários.</p>	<p>Maia e outros (2019)</p>

Tabela 1 – Estado da arte do estudo de chaminés solares para dessalinização

Foco do Estudo	Resumo dos principais resultados	Referências
<p>Avaliação numérica da viabilidade de implantação de um sistema integrado de produção de energia elétrica e água doce obtidos por chaminé solar.</p>	<p>Como resultado, implementando um sistema integrado com uma chaminé solar como principal fonte de energia, a eficiência energética global é obtida em 8,4%, o que é substancialmente superior ao de uma única chaminé solar.</p>	<p>Mendez e Bicer (2020)</p>
<p>Avaliação numérica para uma chaminé solar de dessalinização no porto de Aqaba na Jordânia.</p>	<p>Os resultados mostram que o desenvolvimento de uma usina de destilação por chaminé solar no porto de Aqaba é viável. Em termos numéricos a usina seria capaz de produzir cerca de 481.440 kWh de eletricidade e 123.753 toneladas de água destilada anualmente. Um valor final de custo para \$ 1,86 / kWh na produção desta energia.</p>	<p>Abdelsalam e outros (2020)</p>

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

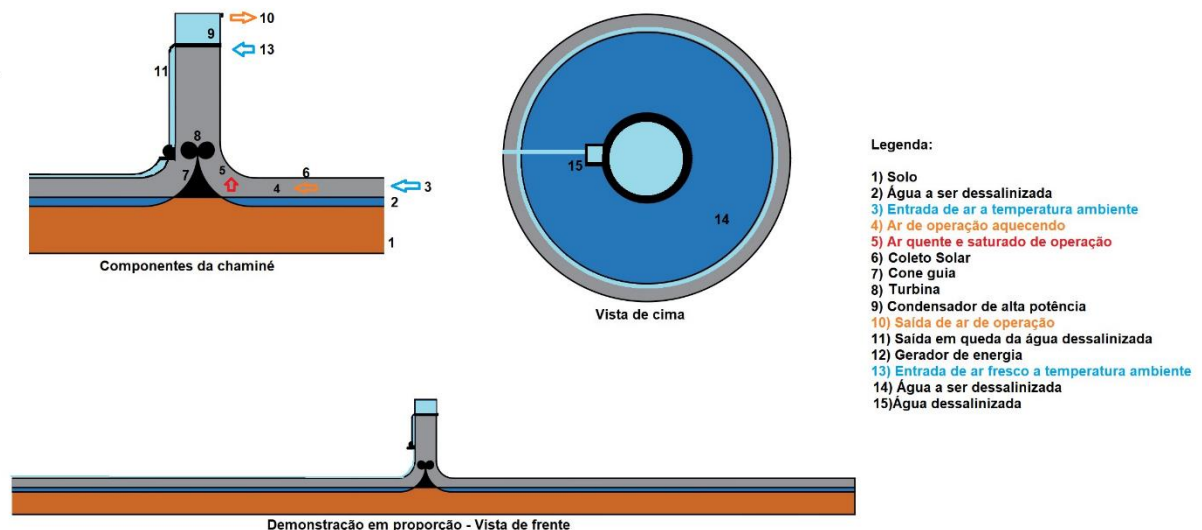
Neste presente estudo um método matemático foi empregado para estimar o desempenho de uma chaminé solar combinada para dessalinização de água e geração de energia elétrica e sua viabilidade econômica. Neste capítulo será apresentada a modelagem matemática empregada no desenvolvimento do presente trabalho.

Para isto este capítulo será subdividido em duas partes. Na primeira será abordada a análise numérica na qual o trabalho está envolvido. Na segunda parte será apresentada a análise econômica referente a este sistema.

3.1 Análise numérica da chaminé solar para dessalinização de água e geração de energia elétrica

A configuração do sistema proposto para dessalinização de água e geração de energia elétrica consiste em quatro componentes como ilustrado na Figura 10:

Figura 10: Sistema proposto de dessalinização e geração de energia elétrica.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Basicamente o sistema é composto pelo coletor solar, chaminé solar, unidade geradora (composta por um gerador, uma turbina e seus auxiliares) e o condensador de alta eficiência. Este sistema é baseado no modelo numérico e experimental feito na cidade de

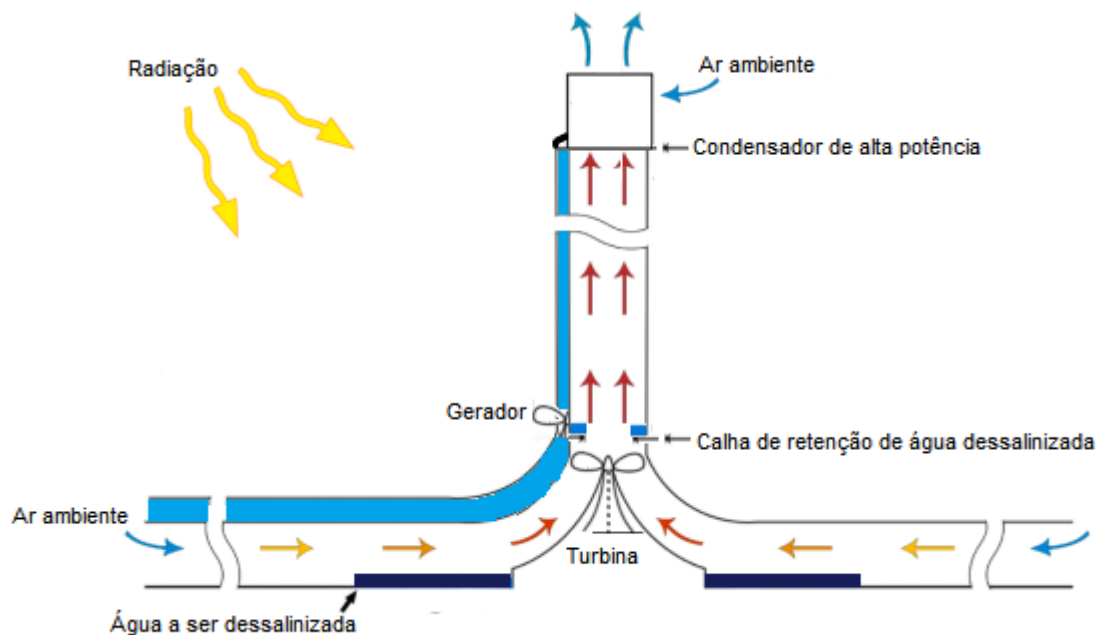
Dalian na China e estudado por Zhou e outros (2010) e Yosif (2014).

Para o sistema proposto neste trabalho, o ar ambiente entra pela chaminé e se torna quente e saturado quando escoar através de uma camada de água salobra a ser dessalinizada, localizada na parte inferior do sistema. Ao chegar ao centro da chaminé este ar movimentado por uma turbina eólica, gerando assim a primeira parcela de energia elétrica do sistema. Ao passar pela turbina o ar quente saturado sobe pela torre da chaminé, ao subir a temperatura diminui e uma pequena quantidade de vapor é então condensada.

Esta parcela de água doce por sua vez desce de uma altura considerável pelo caminho da torre da chaminé, sendo então recolhida em uma calha colocada no fundo à volta do cone guia. Esta mesma água doce disposta agora na calha passa então a ser retirada continuamente.

O ar quente continua seu percurso entrando então diretamente no condensador de alta eficiência após fluir para fora da chaminé. O ar ambiente frio ao redor da saída da chaminé entra naturalmente no condensador devido a uma diferença de pressão. Para isto, o condensador deve ser colocado no topo da chaminé, como pode ser observado na Figura 11:

Figura 11: Funcionamento do sistema proposto.



Fonte: Azad e outros, 2021 (adaptado).

No condensador, o ar ambiente por sua vez mais frio do que o ar interno do sistema é succionado para o interior do dispositivo e misturado internamente com o ar saturado do sistema, dessa forma esse ar é condensado em seu interior produzindo assim água doce. A água doce por sua vez ao sair deste dispositivo cai e aciona os geradores instalados acima do coletor da chaminé para gerar assim a segunda parcela de eletricidade deste sistema, convertendo a energia potencial gravitacional da água em energia elétrica.

Após este procedimento, uma pequena quantidade de água potável pode ser retirada da calha ao fundo do cone guia. A maior parte da água dessalinizada é retirada após sua queda até o gerador fornecendo assim água potável disponível para atender às necessidades locais. Dessa forma, baseado no dispositivo estudado por Zhou e outros (2010) e Yosif (2014) este sistema tem uma dupla vantagem de produção. Quantidades de água doce são produzidas pelo vapor nas paredes da chaminé e pelo vapor após a saída do condensador de alta eficiência.

Além disso, a energia elétrica também passa a ser produzida de duas maneiras, inicialmente por uma turbina inserida na entrada da torre da chaminé solar e, ao lado de fora da torre, onde a energia passa a ser produzida pelo próprio gerador. Dessa forma este sistema facilita a produção de água doce, bem como o fornecimento de energia elétrica local (Yosif, 2014; Zhou e outros, 2010).

A chaminé e o condensador de alta eficiência são os principais e únicos componentes que são discutidos e avaliados neste estudo. Para estimar o desempenho desses equipamentos, foram utilizados os valores estimados por Zhou e outros (2010) e Yosif (2014) avaliados para as propriedades dimensionais do sistema e de eficiência do condensador.

O modelo construído para este trabalho foi baseado nas premissas principais que regem o funcionamento da chaminé solar e do condensador de alta eficiência. Para isso, os estudos e trabalhos de Maia (2005), Zhou e outros (2010), Dhahri e Omri (2013), Cengel (2014), Yosif (2014) e Zuo e outros (2021) foram utilizados.

As considerações assumidas foram:

- 1 – A torre da chaminé foi inteiramente considerada como um sistema sem mudança de área transversal (diâmetro constante);
- 2 – O ar foi considerado como gás ideal;
- 3 – Todas as paredes que envolvem o sistema da chaminé foram consideradas adiabáticas;

4 – Não foram consideradas perdas adicionais do sistema.

Para o condensador de alta eficiência foi considerado que:

1 – As condições de operação são estáveis;

2 - O condensador é bem isolado em relação ao ambiente externo. Dessa forma a perda de calor para o ambiente é desprezível e a transferência de calor do ar úmido no final da chaminé é considerada igual à transferência de calor para o ar ambiente que entra no condensador;

3 - O coeficiente global de transferência de calor é fixo e uniforme, sendo que, o valor médio de tempo considerado para este trabalho foi o equivalente a 24 horas (86400 segundos) e uma radiação solar de 384W/m^2 para Brumadinho;

4 – Mudanças de energia cinética e potencial dos fluidos foram desprezadas.

3.2 A chaminé solar

Para este sistema, a chaminé é considerada o motor térmico quem converte a energia disposta no escoamento de ar quente saturado em energia cinética, energia esta que é diretamente determinada pelo aumento da temperatura do escoamento de ar de saída do coletor e da altura da chaminé (Zhou e outros, 2008; Ming, 2016). Neste sistema estudado, considera-se a chaminé como ideal, ou seja, não apresenta alteração de área, obstruções internas, atrito de parede ou perdas adicionais no sistema (Von Backstrom e Gannon, 2000; Yosif, 2014).

Os valores de temperatura do ar na entrada da chaminé considerados para este trabalho foram retirados a partir do ano padrão. O projeto *Solar and Wind Energy Resource Assessment* (SWERA) visa à montagem de informações de alta qualidade sobre os recursos de energia solar e eólica determinando o *Typical Meteorological Year* (TMY) ou ano padrão para as diversas cidades brasileiras, incluindo a cidade de Belo Horizonte. O TMY ou ano padrão consiste no conjunto de dados e parâmetros climatológicos para um ano que representa o cenário mais provável para este parâmetro ou grupo de parâmetros ao longo do ano. Com isso, os dados presentes no ano padrão consistem de 12 meses, selecionados individualmente a partir de uma série histórica de aproximadamente 23 anos (Crawley e Huang, 1997; Castro Silva 2018).

Desta forma, de acordo com os dados disponíveis da SWERA para a cidade de Belo Horizonte, o ar úmido na entrada da chaminé a 22°C e com uma velocidade média de 6,93 m/s medida na entrada da chaminé.

A pressão parcial de vapor pode ser estimada pela Equação (1):

$$P_v = \rho_v \cdot R_v \cdot T \quad (1)$$

Onde ρ_v é a densidade de vapor, R_v a constante específica do gás de vapor (461 JKg⁻¹K⁻¹) e T a temperatura absoluta do escoamento (Moran e Shapiro, 2002).

Uma vez calculada a pressão parcial de vapor, para determinar a umidade absoluta do sistema, de acordo com Moran e Shapiro (2002) como função da umidade absoluta e da pressão atmosférica, a pressão parcial do vapor d'água pode ser estimada pela Equação (2):

$$P_v = P \cdot \frac{\omega}{0.622 + \omega} \quad (2)$$

Onde P é a pressão atmosférica e ω é a umidade absoluta.

Por sua vez, a pressão parcial do ar seco pode ser calculada subtraindo a pressão atmosférica da pressão parcial de vapor (Zhou e outros, 2010). Sendo assim, ainda de acordo com Zhou e outros (2010), ao considerar a pressão atmosférica, a densidade do ar úmido passa a ser expressa a partir da Equação (3):

$$\rho = \frac{P - P_v}{R_d \cdot T} + \frac{P_v}{R_s \cdot T} \quad (3)$$

Os valores das constantes específicas de ar seco (R_d) e vapor (R_s) são iguais a 287Jkg⁻¹K⁻¹ e 461Jkg⁻¹K⁻¹ respectivamente.

Para calcular a umidade relativa de ar úmido do sistema (ϕ) foi usado outra relação proposta para calcular a densidade do ar úmido é expressa por Zhou e Yang (2009) a partir da Equação (4):

$$\rho = \frac{P - \phi P_v}{R_d \cdot T} + \frac{\phi \cdot P_v}{R_s \cdot T} \quad (4)$$

De acordo com Zhou e Yang (2009) e Moran e Shapiro (2002) a partir da umidade relativa do ar úmido pode-se definir a pressão de saturação do vapor do sistema (P_v), determinado pela relação da Equação (5):

$$\phi = \frac{P_v}{P_{sv}} \quad (5)$$

P_{sv} é a pressão de saturação do vapor a uma dada temperatura.

Por sua vez, de acordo com Cengel e outros (2014) a partir da relação da umidade específica do ar úmido (ω) pode ser calculado a pressão parcial do ar seco (P_d) a partir da Equação (6):

$$\omega = 0.622 \cdot \frac{P_v}{P - P_d} \quad (6)$$

Para a determinação do calor específico do vapor a pressão constante (C_p) de acordo com Moran e Shapiro (2002) é estimada pela Equação (7):

$$C_p = 1880 \cdot \omega + 1010 \quad (7)$$

De acordo com Zhou e outros (2010), a entalpia específica do vapor de água (h) pode ser calculada pela Equação (8):

$$C_p T_0 = \frac{u^2}{2} + C_p T = h \quad (8)$$

A partir das relações dadas por essas igualdades é possível também calcular T_0 (que é a temperatura encontrada quando se há ausência de circulação da água no sistema de aquecimento) e u é a velocidade na direção vertical.

Apesar de se tratar de um sistema modelado como gás ideal e baixas temperaturas, a relação entre as temperaturas calculadas no interior do dispositivo será dependente do número de MACH.

Na entrada e na saída da chaminé o número de Mach é uma quantidade adimensional que representa a razão da velocidade de um objeto se movendo através de um fluido (u) e

a velocidade local do som (c) podendo ser expressa a partir da Equação 9 (Fox e outros, 2010):

$$MACH = \frac{u}{c} \quad (9)$$

Para calculá-lo é necessário determinar a velocidade do som, onde esta pode ser estimada pela Equação 10 (Fox e outros, 2010):

$$c = \sqrt{K \cdot R \cdot T} \quad (10)$$

C é a velocidade do som, K é a razão de calores específicos, R é a constante dos gases e T a temperatura absoluta.

Von Backstrom e Gannon (2000) determinaram que a temperatura na entrada da tubina da chaminé (T_{01}) pode ser estimada a partir da Equação (11):

$$T_1 = \frac{T_{01}}{\left[\frac{1 + MACH_1^2 (K-1)}{2} \right]} \quad (11)$$

De acordo com Zhou e outros (2010) o valor de K (razão de calor específico) vale 1,4.

A partir da relação da Equação (12) é capaz de se obter o valor dado a T_{01} , valor este que determina a temperatura do ar de operação na entrada da chaminé.

Como o sistema estudado trata de uma chaminé solar de grandes dimensões, estudos de Zhou e outros (2010), Von Backstrom e Gannon (2000), Zhou e outros (2009) e Fathi (2014) determinaram que apesar de os valores de Mach em seu interior não se tratarem de valores constantes, os únicos que terão impactos diretos no sistema serão os respectivos valores para a entrada e saída da chaminé.

A relação desses valores de Mach é dependente da quantidade de calor latente liberado pelo vapor de água total no sistema (ΔQ), dessa forma, a Equação (12) de acordo com Zhou e outros (2010) é referente ao calor latente da água a ser dessalinizada no sistema:

$$L = 2502535,259 - 212,56384T \quad (12)$$

Onde T é a temperatura.

Ainda para determinar o calor latente de vapor liberado no sistema é necessário calcular a vazão mássica do ar que passa através da entrada da chaminé (\dot{m}_f). De acordo com Zhou e outros (2010) esta variável pode ser resolvida pela Equação (13):

$$\dot{m}_f = \rho \cdot A_{ch} \cdot u \quad (13)$$

A_c é a área transversal da chaminé, u é a velocidade na entrada da chaminé e ρ é a densidade do ar de operação.

Por sua vez, ainda de acordo com Zhou e outros (2010) uma vez determinada a vazão mássica do ar de operação a partir da Equação (14) é possível calcular a vazão mássica da quantidade de água presente no ar de entrada da chaminé ($\Delta\dot{m}_{agua}$):

$$\Delta\dot{m}_{agua} = \dot{m}_f \frac{d_1}{1+d_1} - \dot{m}_f \frac{d_2}{1+d_2} \quad (14)$$

d_1 é referente ao diâmetro do coletor da chaminé e d_2 é referente ao diâmetro do condensador de alta eficiência.

Por sua vez, a partir dos resultados obtidos nas Equações (12), (13) e (14) passa a ser possível obter então o calor latente liberado pelo vapor de água total do sistema (ΔQ). De acordo com Zhou e outros (2010) este é obtido a partir da Equação (15):

$$\Delta Q = L \Delta\dot{m}_{agua} \quad (15)$$

Desta forma, os números de Mach na entrada e na saída da chaminé podem ser avaliados a partir da relação estudada também por Von Backstrom e Gannon (2000) e expressa na Equação (16):

$$\ln Mach_2 - \frac{1}{2} Mach_2^2 = \frac{r-1}{c_p^2} \Delta Q + \frac{g}{c_p^2} H_1 + \ln Mach_1 - \frac{1}{2} Mach_1^2 \quad (16)$$

$Mach_2$ representa o número de Mach na saída da chaminé, $Mach_1$ o número de Mach na entrada da chaminé e r o raio da chaminé.

Estudos de Zhou e outros (2010) e Yosif (2014) propõem que a temperatura de estagnação do escoamento de ar da saída da turbina da chaminé T_{02} pode ser estimada a partir da relação de calor específico, temperatura de estagnação do escoamento de ar na entrada da chaminé, pela aceleração da gravidade e por ΔQ que é o calor latente liberado pelo vapor de água total que entra no condensador de alta potência do sistema, essa relação se segue a partir da Equação (17):

$$\frac{h}{c_p} + T_{01} - \frac{g}{c_p} H_1 = T_{02} \quad (17)$$

Na saída da chaminé, a temperatura estática do escoamento de ar operacional na saída da chaminé (T_2) calculada por Zhou e outros (2010) e Yosif (2014) é dada a partir da Equação (18):

$$T_2 = \frac{T_{02}}{\left[1 + \frac{(MACH_2^2(K-1))}{2}\right]} \quad (18)$$

De acordo com Zhou e outros (2009), a pressão estática da atmosfera (P) a uma altura qualquer é expressa pela Equação (19):

$$P = P_0 \left(1 - \frac{0.0065 z}{T_0}\right)^{5.256} \quad (19)$$

P_0 é a pressão dada pela condição atmosférica e z é a altura da chaminé. Ainda de acordo com os estudos de Zhou e outros (2009), a temperatura de estagnação da atmosfera a uma altura qualquer, pode ser expressa em função da temperatura dada pela condição atmosférica T_0 e de sua altura usando a relação apresentada a partir da Equação (20):

$$T = T_0 - 0.0065 z \quad (20)$$

A partir dos estudos de Zhou e outros (2010) e Yosif (2014) foi determinado que a diferença de pressão ΔP que é produzida entre a entrada e a saída da chaminé é calculado pela Equação (21):

$$\Delta P = g \cdot \int_0^{H_1} ((\rho_{a1} - \rho_1) - (\beta_a - \beta)) dh =$$

$$g \cdot \left((\rho_{a1} - \rho_1) H_1 - \frac{1}{2} (\beta_a - \beta) H_1^2 \right) \quad (21)$$

β_a é a gradiente médio de densidade do ar ambiente, β é o gradiente médio de densidade do ar na chaminé, H_1 é a altura da chaminé, ρ_{a1} é a densidade do ar ambiente na entrada da chaminé e ρ_1 é a densidade do ar de operação na entrada da chaminé.

Porém, para a determinação da diferença de pressão é necessário se conhecer os valores dos gradientes médios de densidade do ar ambiente e na chaminé. Dessa forma, ainda de acordo com Zhou e outros (2010), os valores de β e β_a podem ser calculados a partir das Equações (22) e (23) respectivamente:

$$\beta = \frac{\rho_2 - \rho_1}{H_1} \quad (22)$$

$$\beta_a = \frac{\rho_{a2} - \rho_0}{H_1} \quad (23)$$

Onde ρ_2 é a densidade de ar operacional na saída da chaminé, ρ_1 é a densidade de ar operacional na entrada da chaminé, ρ_{a2} é a densidade do ar ambiente no condensador, ρ_0 é a densidade do ar ambiente que entra no condensador.

Por sua vez, a velocidade vertical do ar na saída da turbina (u_1) é estimada por Zhou e outros (2010) pela Equação (24):

$$u_1 = \sqrt{\frac{2(1-n)\Delta P}{\theta \cdot \rho_1}} \quad (24)$$

n é o fator de queda de pressão na turbina (vida útil) do sistema integrado de usina, ΔP é a diferença produzida pela pressão entre o ar ambiente e a base da chaminé e θ é o coeficiente de perda total de pressão.

Neste trabalho o valor relacionado a n será considerado como 0.9. E estudos de Zhou e outros (2010) e Yosif (2014) afirmam que n pode ser considerado constante, sendo este um fator de pressão reduzida na turbina, por sua vez θ representa o coeficiente de perda de

pressão total que envolve o fator de atrito da perda na chaminé, onde neste trabalho foi adotado o valor de $f = 0.008428$, valor este determinado experimentalmente a partir dos estudos de Zhou e outros (2008).

Por fim a energia produzida pela turbina pode ser calculada pela Equação (25):

$$\dot{W}_{at} = \eta_{at} \cdot n \cdot A_{ch} \cdot u_1 \cdot \Delta P \quad (25)$$

Onde \dot{W}_{at} é a energia produzida pela turbina de ar, η_{at} é a eficiência da turbina de ar, n é o fator de queda de pressão na turbina (vida útil) do sistema integrado de usina, A_{ch} é a área da chaminé, u_1 é a velocidade de operação do ar na entrada da chaminé e ΔP é a diferença produzida pela pressão entre o ar ambiente e a base da chaminé.

Para este estudo foi assumido os valores de Schlaich (1995) onde este assumiu a eficiência do gerador de turbina a ar (η_{at}) como 80%.

3.3 O Condensador de alta potência

O condensador de alta potência é um trocador de calor. Este pode ser modelado através do método DTML ou NTU. Para este trabalho o mesmo foi usado como referência o modelo de Yosif (2014) e Cengel e outros (2014) que afirmam que o método de efetividade a partir do número de unidades de transferência (NTU) é o método mais apropriado para selecionar o tipo adequado de aplicação de trocador de calor. Esta afirmação se dá pois, este mesmo consegue determinar qualquer temperatura desconhecida de entrada ou saída e a taxa de transferência de calor usando apenas um balanço de energia.

A efetividade de um trocador de calor é definida como a razão entre a taxa real de transferência de calor e a taxa máxima de calor possível, Equação 26 (Cengel, 2014):

$$\varepsilon = \frac{\dot{Q}}{\dot{Q}_m} = \frac{\text{Taxa real de transferência de calor}}{\text{taxa máxima de transferência de calor possível}} \quad (26)$$

Cengel e outros (2014), afirmam que a diferença máxima de temperatura na troca de calor deste sistema está relacionado a diferença entre a temperatura de estagnação do escoamento de ar na saída da chaminé e a temperatura na entrada do condensador. Isso então ajuda a determinar a taxa máxima de transferência de calor (ΔT_{max}) possível no trocador de calor, taxa esta que pode ser determinada a partir da Equação (27):

$$\Delta T_{max} = T_2 - T_{a2} \quad (27)$$

T_{a2} é a temperatura do ar na entrada do condensador.

Por sua vez, de acordo com Zhou e outros (2010) a vazão mássica do ar de operação no condensador (\dot{m}_g) pode ser estimada pela Equação (28):

$$\dot{m}_g = \rho_g \cdot u_g \cdot A_{cond} \quad (28)$$

De acordo com James e Parsons (1920) o valor do fator de densidade (DF) pode ser calculado a partir da Equação (29):

$$DF = \frac{\rho_{a2}}{\rho_g} \quad (29)$$

Onde ρ_{a2} é a densidade do ar na entrada do condensador e ρ_g é a densidade do ar ambiente na saída da chaminé.

De acordo com James e Parsons (1920) a vazão mássica de ar na entrada do condensador pode ser expresso a partir da Equação (30):

$$\dot{m}_{a2} = \dot{m}_g \cdot DF \quad (30)$$

Onde \dot{m}_g é a vazão mássica do ar na saída da chaminé.

Dessa forma, Cengel e outros (2014) também afirmam que a transferência de calor em um trocador de calor chegará a seu valor máximo quando o fluido quente é resfriado à temperatura de entrada do fluido. Dessa forma a taxa máxima de transferência de calor possível no condensador (\dot{Q}_m) é determinada pela Equação (31):

$$\dot{Q}_m = CR_{min} \cdot \Delta T_{max} \quad (31)$$

A determinação do CR_{min} de acordo com Cengel e outros (2014) é dada pela razão das Equações (32) e (33) onde se obterá respectivamente CR_2 (a razão da capacidade de ar operacional na saída da chaminé) e CR_{a2} (a razão da capacidade de ar ambiente na entrada do condensador):

$$CR_2 = \dot{m}_{f2} \cdot C_{p2} \quad (32)$$

$$CR_{a2} = \dot{m}_{a2} \cdot C_{pa} \quad (33)$$

Onde \dot{m}_{a2} é a vazão mássica de ar ambiente na entrada do condensador, \dot{m}_{f2} é a vazão mássica de ar operacional na saída da chaminé, C_{p2} é o calor específico do ar operacional na saída da chaminé e C_{pa} é o calor específico do ar ambiente na entrada do condensador.

Ainda de acordo com Cengel e outros (2014) a estimativa da taxa máxima de transferência de calor possível em um condensador (\dot{Q}_m) depende da temperatura de entrada do ar e do fluido frio bem como da sua vazão mássica, uma vez que a eficácia do condensador é conhecida a taxa real de transferência (\dot{Q}) passa a ser determinada pela Equação (34):

$$\dot{Q} = \varepsilon \cdot \dot{Q}_m \quad (34)$$

Onde ε é a efetividade do condensador. Ainda de acordo com Cengel e outros (2014) a taxa real de transferência de calor em um condensador pode ser determinada a partir de um balanço de energia nos fluidos quentes ou frios e sendo expressa pela Equação (35):

$$\dot{Q} = CR_{a2}(T_{a3} - T_{a2}) = CR_2 (T_2 - T_3) \quad (35)$$

Onde T_{a3} é a temperatura de estagnação do ar ambiente na saída do condensador.

A vazão mássica de água no condensador (\dot{m}_{agua2}) pode ser expressa pela Equação 36 (Zhou e outros, 2010):

$$\dot{m}_{agua2} = \left(\frac{\omega_2}{1 + \omega_2} - \frac{\omega_3}{1 + \omega_3} \right) \cdot \dot{m}_{f2} \quad (36)$$

Onde ω_2 é a umidade do ar operacional na entrada do condensador e ω_3 é a umidade do ar operacional na saída do condensador.

De acordo com Zhou e outros (2010) a potência do gerador (\dot{W}_{ag}) é estimada pela Equação (37):

$$\dot{W}_{wg} = \eta_{ag} \cdot \dot{m}_{agua2} \cdot g \cdot H \quad (37)$$

Baseando este estudo nos dados obtidos por Zhou e outros (2011) e Yosif (2014) foi determinado que a eficiência do gerador η_{wg} obtêm o valor de 90% .

Sendo assim, a energia elétrica total do sistema (\dot{W}_{total}) é igual à soma da energia gerada a partir do gerador de turbina (\dot{W}_{at}) e da energia gerada partir do gerador (\dot{W}_{ag}), podendo esta então ser expressa como a Equação 38 (Zhou e outros, 2010; Yosif, 2014):

$$\dot{W}_{total} = \dot{W}_{at} + \dot{W}_{ag} \quad (38)$$

Ainda de acordo com Zhou e outros (2010) e Yosif (2014), a saída de calor do condensador de alta eficiência (\dot{Q}_w) pode ser estimada pela Equação 39:

$$\dot{Q}_w = h_{fg} \cdot \dot{m}_{agua2} \quad (39)$$

Onde h_{fg} é o calor latente da água.

Por fim, a eficiência total do sistema de conversão de energia (η_{pp}) é expressa pela Equação 40 (Zhou e outros, 2010; Yosif, 2014):

$$\eta_{pp} = \frac{\text{saída desejada}}{\text{entrada desejada}} = \frac{(\dot{W}_{total} \cdot \dot{Q}_w)}{(A_{coll} \cdot I)} \quad (40)$$

Onde \dot{W}_{total} é a energia elétrica total do sistema, \dot{Q}_w é a saída de calor do condensador de alta eficiência, A_{coll} é a área do coletor e I é a irradiação solar.

3.4 Análise econômica da chaminé solar para dessalinização de água e geração de energia elétrica

O modelo econômico baseado em um modelo matemático para chaminé solar apresentado neste trabalho é baseado nos modelos descritos por Yosif (2014) e Zhou e outros (2011). O custo total da chaminé solar apresentada (F_{pp}) pode ser calculado a partir da Equação 41:

$$F_{pp} = \frac{\pi}{4} (D_{coll}^2 - D_{ch}^2) \cdot \frac{\epsilon_{coll}}{m^2} + \pi D_{ch} H_{ch} \cdot \frac{\epsilon_{ch}}{m^2} + \epsilon_{at} + \frac{\pi}{4} D_{cond}^2 \cdot \frac{\epsilon_{cond}}{m^2} \quad (41)$$

Onde D_{coll} é o diâmetro do coletor solar, ϵ_{coll} é o preço do coletor, H_{ch} é a altura da chaminé, ϵ_{ch} é o preço da chaminé, ϵ_{at} é o preço da turbina eólica somado ao preço do gerador, D_{cond} é o diâmetro do condensador e ϵ_{cond} é o preço do condensador.

Para este tipo projeto, a vida útil (n_{util}) considerada pelos modelos de Attig-Bahar (2021), Azad (2021), Yosif (2014) e Zhou e outros (2011) disponíveis na literatura leva no mínimo 25 anos, e, a taxa de juros anual (i) considerada a um projeto como esse assume o valor de 6,2%, sendo assim, o coeficiente de anuidade do sistema (ξ) estimado para este projeto é apresentado na Equação 42:

$$\xi = \frac{i(1+i)^{n_{util}}}{[(1+i)^{n_{util}} - 1]} \quad (42)$$

Ainda de acordo com Zuo e outros (2011), uma vez calculado o coeficiente de anuidade do sistema é possível então obter a média do investimento anual, esta é expressa pela Equação 43:

$$F_{yr} = F_{pp} \cdot \xi \quad (43)$$

Apesar de se tratar de um dado irreal, o período de irradiação usado na literatura estudada para este trabalho foi de 24 horas de irradiação solar, período este chamado de operação por Attig-Bahar (2021), Azad (2021), Yosif (2014) e Zhou e outros (2011). Tendo como período de operação da chaminé 24 horas operando durante todos os dias do ano, a produção de energia anual (\dot{W}_y) pode ser calculada pela Equação 44 (Zhou e outros, 2010):

$$\dot{W}_y = \text{número de dias durante o ano} \cdot \dot{W}_{total} \quad (44)$$

Por sua vez, a receita recebida pela potência anual da produção energética (E_{power}) feita chaminé é estimada pela Equação 45 (Zuo e outros, 2011):

$$E_{power} = \text{¥} \cdot \dot{W}_y \quad (45)$$

Onde ¥ é o preço da eletricidade no lugar onde a planta será instalada.

A produtividade anual de água potável dessalinizada ($m_{\text{água}}$) por este sistema pode ser calculada a partir da Equação 46 (Yosif, 2014):

$$m_{\text{aguatotal}} = \alpha \cdot \beta_{\text{horas}} \cdot 3600 \cdot (\dot{m}_{\text{água1}} + \dot{m}_{\text{água2}}) \quad (46)$$

Onde $\dot{m}_{\text{água1}}$ é referente a vazão mássica de vapor de água dessalinizado na chaminé, $\dot{m}_{\text{água2}}$ é referente a vazão mássica de vapor de água dessalinizado no condensador, α é o número de dias que a planta irá operar em um ano e β é a quantidade de horas que a planta irá operar em um dia.

Neste sistema estudado, ao contrário de uma usina termelétrica tradicional, quase nenhum gás de efeito estufa está relacionado a sua operação, ainda quando avaliado todo o sistema integrado. O equivalente de dióxido de carbono (CO_2) liberado pelo sistema da chaminé solar se comparada a uma usina termelétrica comum obtém um valor de 0,95 kg de emissões de CO_2 por kWh de eletricidade produzida (Zou e outros, 2011). Dessa forma, a quantidade de redução de emissão de CO_2 (M_{CO_2}) exercida por este sistema é dada na Equação 47:

$$M_{\text{CO}_2} = (0.95 \cdot \dot{W}_y) \quad (47)$$

De acordo com Yosif (2014) e Zuo e outros (2011), a partir do preço por tonelada do crédito de carbono atual é possível mensurar a receita total de crédito carbono (E_{CO_2}) gerado pelo sistema de acordo com a Equação 48:

$$E_{\text{CO}_2} = 21.4 \cdot M_{\text{CO}_2} \quad (48)$$

Sendo assim, ainda de acordo com Yosif (2014) e Zuo e outros (2011) passa a ser possível calcular o preço da água dessalinizada produzida ($\text{CUSTO}_{\text{água}}$) utilizando a Equação 49:

$$\text{CUSTO}_{\text{água}} = \frac{F_{\text{yr}} - E_{\text{CO}_2} - E_{\text{power}}}{\frac{\dot{m}_{\text{água}}}{\rho_{\text{água}} \cdot 10^{-3}}} \quad (49)$$

Por fim, de acordo com Zuo e outros (2011) o período de retorno ($P_{retorno}$) é determinado pelo tempo em que se espera que a saída do investimento inicial de um sistema se recupere das entradas de investimento feitas por este. Para este sistema, uma das técnicas de avaliação deste investimento pode ser definida a partir da Equação 50:

$$P_{retorno} = \frac{F_{pp}}{E_{\acute{a}gua} + E_{\dot{W}_y}} \quad (50)$$

Onde $E_{\acute{a}gua}$ é a receita anual da produção de água dessalinizada pela chaminé e $E_{\dot{W}_y}$ é a receita anual da produção energética feita pela chaminé.

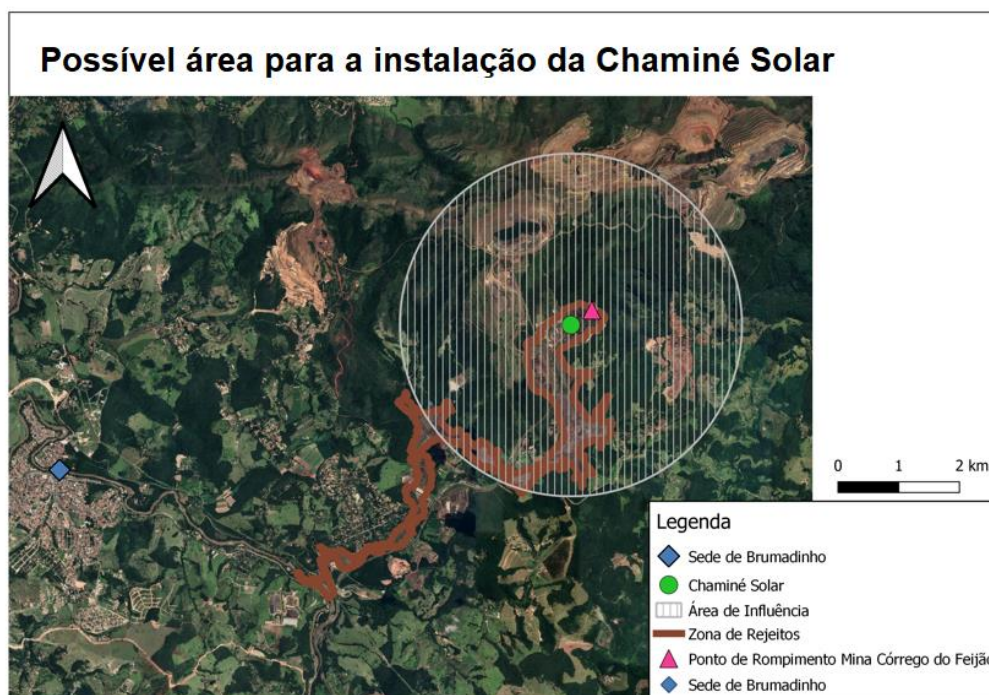
4 METODOLOGIA

Neste capítulo é feita a análise do sistema proposto considerando o modelo matemático a partir de uma chaminé solar de grande porte combinada para dessalinização de água e geração de energia.

Apesar de se tratar de um estudo numérico a primeira proposição feita para este trabalho está relacionada a investigação de um possível lugar de aplicação do mesmo. Uma vez que seria necessário um desvio do curso da água natural do rio Paraopeba para a realização do processo de dessalinização, o melhor local de aplicação para a chaminé estudado foi ao lado da antiga Barragem 2 de minério da VALE. Dessa forma o ambiente no qual ainda se encontra largamente destruído após a tragédia seria novamente utilizado e, por se tratar de uma área próxima ao rio também vem a ser muito conveniente para o processo.

A Figura 12 demonstra a área pensada para a proposição da aplicação do trabalho:

Figura 12: Possível área para instalação da chaminé solar estudada no município de Brumadinho – Minas Gerais, Brasil.



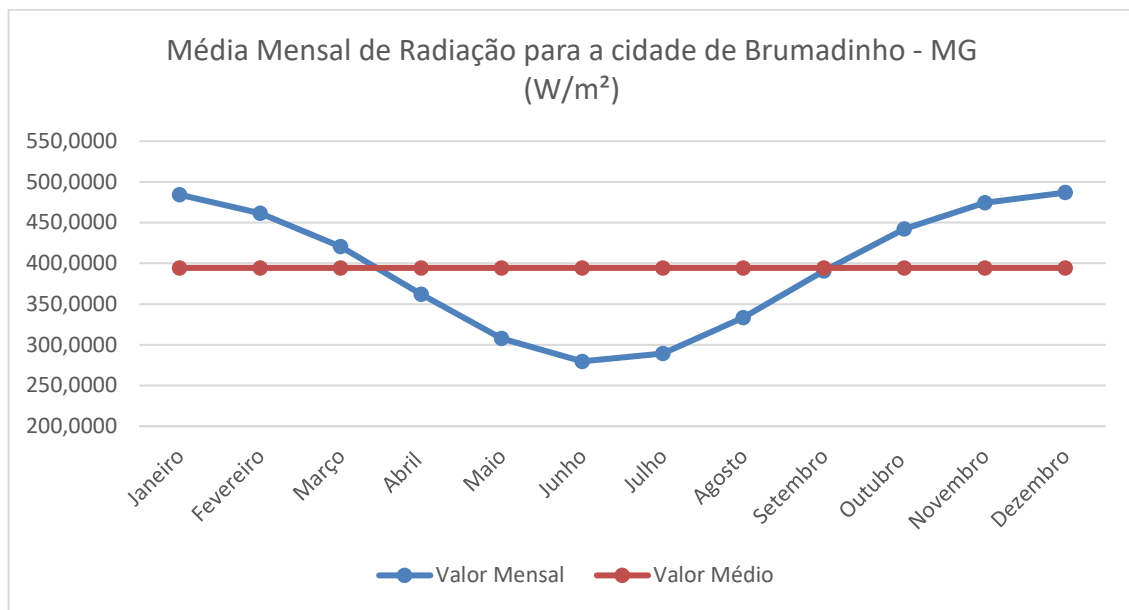
Fonte: IBGE, 2021 (adaptado).

Apesar de se tratar de uma chaminé de grande escala (6000 metros o diâmetro do coletor) como pode ser observado a partir da Figura 12 sua extensão não afetaria o centro da cidade Brumadinho por exemplo, ficando esta em uma região um pouco mais afastada, o que acaba sendo um outro ponto positivo da região em relação ao projeto.

Um dos parâmetros mais importantes para este trabalho é a radiação solar incidente

sobre o mesmo. Para a determinação deste valor foi calculado a partir da localização geográfica do município de Brumadinho os dados de radiação extraterrestre, tendo como valores referenciais para H_0 (Radiação diária extraterrestre na superfície horizontal) calculados com base na média do dia médio de cada mês proposto por Duffie e Beckman (2006) dispostos na Figura 13:

Figura 13: Média mensal de radiação para a cidade de Brumadinho – MG (W/m^2).

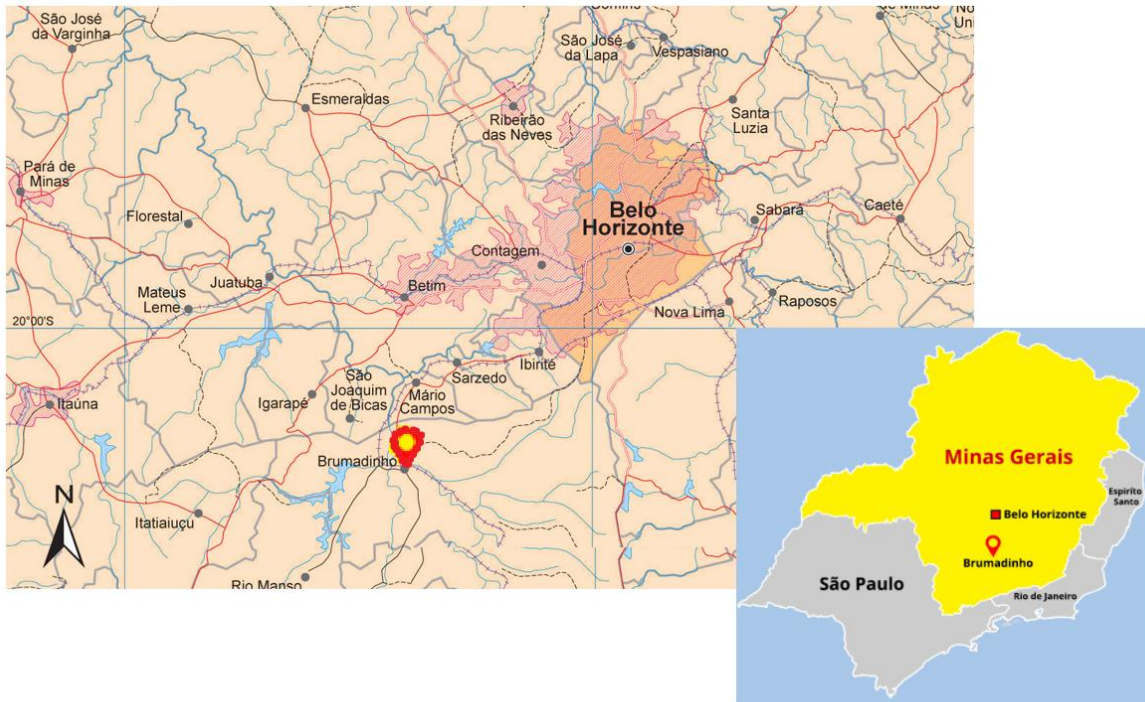


Fonte: Elaborado pelo autor.

Assim, para melhor aplicabilidade da chaminé em todo o ano, o valor de radiação assumido para este papel passou a ser o valor referencial da média anual dos valores calculados para a cidade de Brumadinho, sendo este $384 W/m^2$.

Em relação ao modelo matemático aplicado a este trabalho, este foi baseado em um modelo teórico a fim de se obter melhores resultados comparativos baseados na literatura de Attig-Bahar (2021), Azad (2021), Yosif (2014) e Zhou e outros (2011) onde se obtém uma chaminé solar teórica com 500 metros de altura, um diâmetro da torre de 160 metros e um diâmetro do coletor de 6000 metros, pensado para a cidade de Brumadinho, Minas Gerais (Figura 14):

Figura 14: Localização geográfica de Brumadinho no estado de Minas Gerais, Brasil.

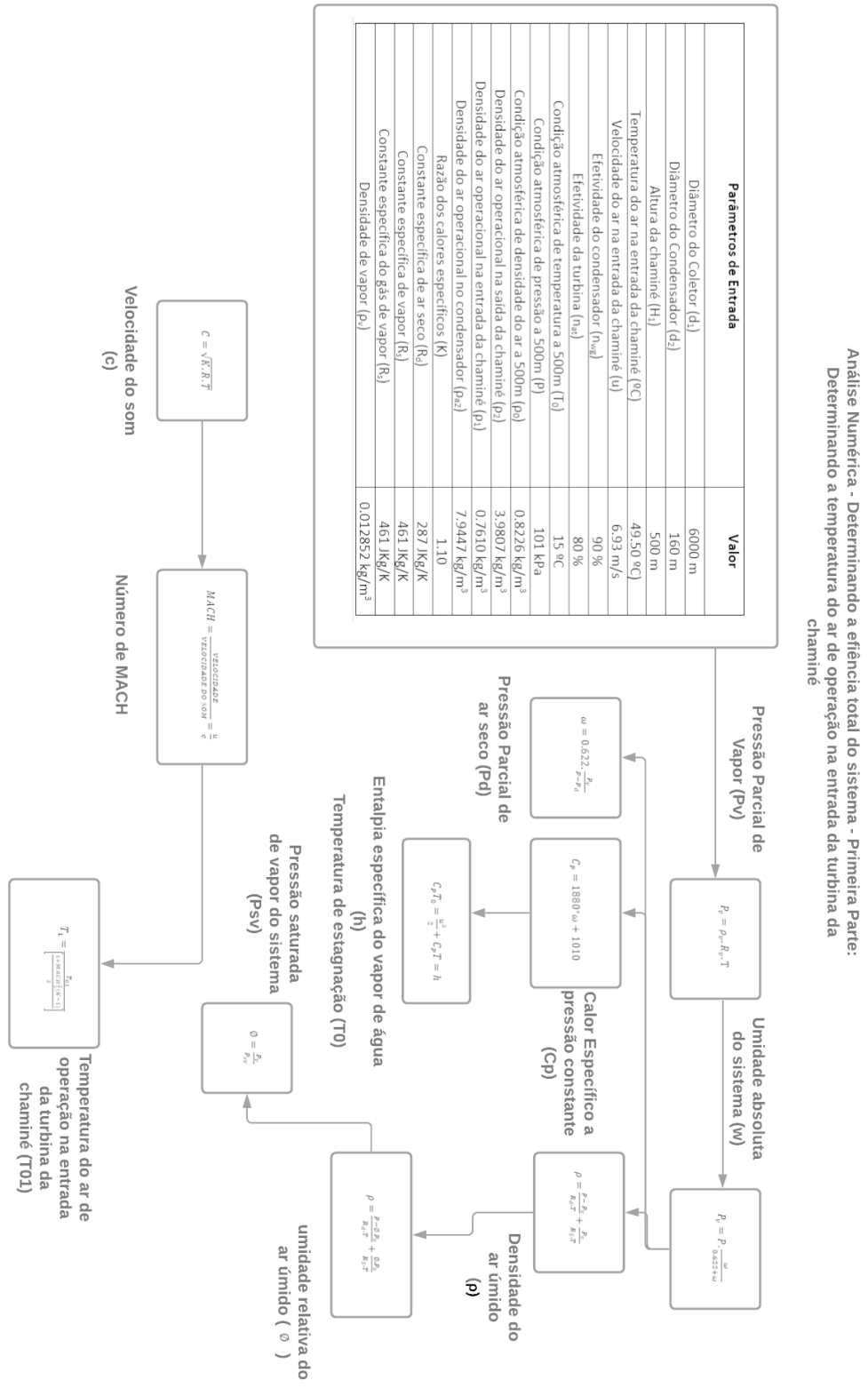


Fonte: Google Maps - adaptado.

Para a cidade de Brumadinho a condição atmosférica típica é de cerca de 295,15K e 101kPa, a velocidade do vento ao nível do mar é de 6,93m/s, dados de acordo com mapa solar da SWERA.

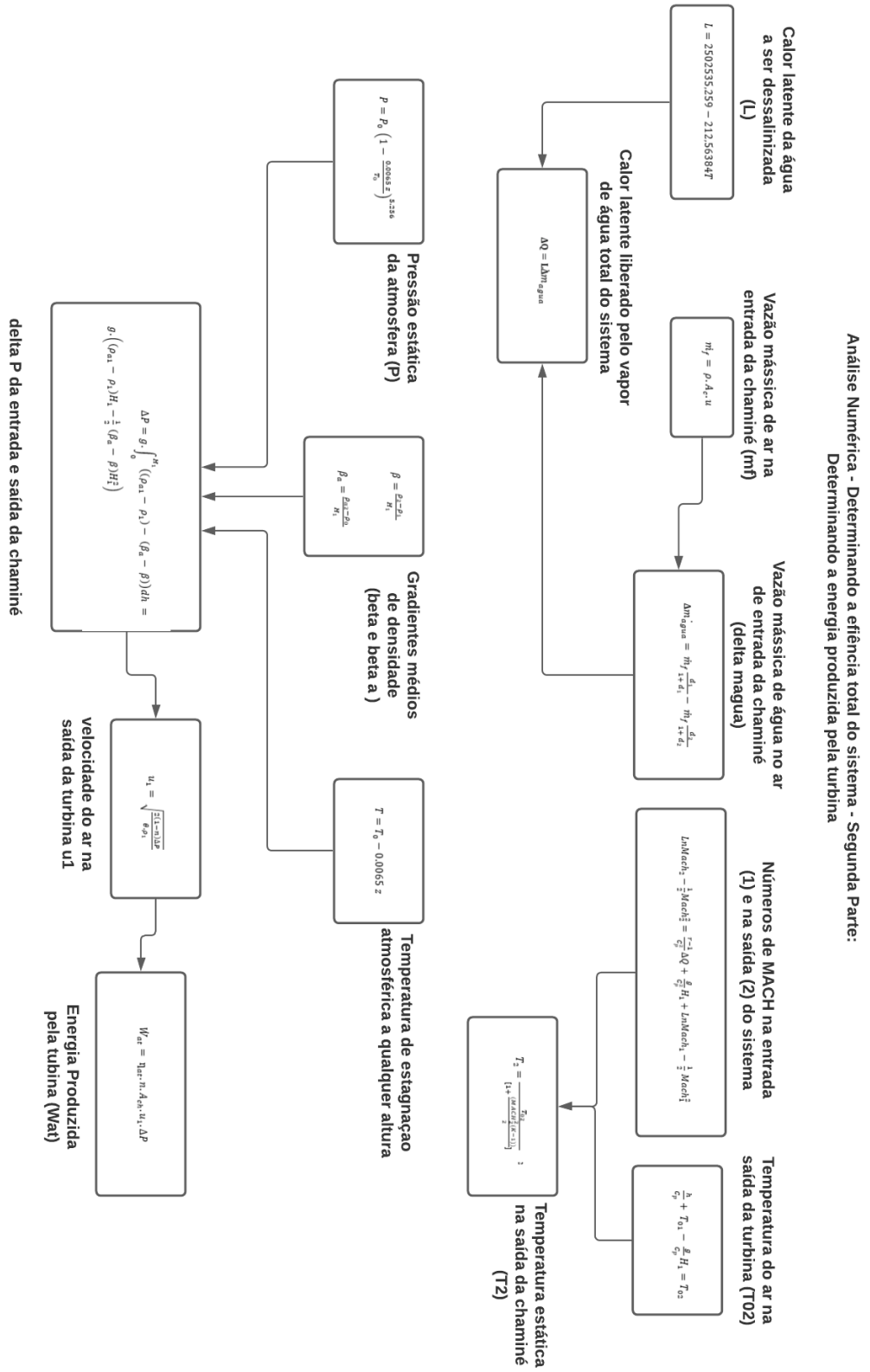
A partir do equacionamento proposto pela fundamentação teórica deste trabalho, foram feitos quatro fluxogramas indicando a ordem dos cálculos dos parâmetros necessários avaliados para este trabalho. As Figuras (15), (16), (17) e (18) apresentam os fluxogramas na seguinte ordem: Análise numérica – Determinando a eficiência total do sistema – Primeira parte: Determinando a temperatura do ar de operação da turbina da chaminé (Figura 15); Análise numérica – Determinando a eficiência total do sistema – Primeira parte: Determinando a energia produzida pela turbina (Figura 16); Análise numérica – Determinando a eficiência total do sistema – Primeira parte: Determinando a energia produzida pelo condensador somado com a turbina e assim obtendo a eficiência total do sistema (Figura 17); Segunda Parte: Análise Econômica – Determinando o custo de água dessalinizado e o retorno financeiro do projeto (Figura 18).

Figura 15: Fluxograma da análise numérica – Determinando a eficiência total do sistema – Primeira parte: Determinando a temperatura do ar de operação da turbina da chaminé.



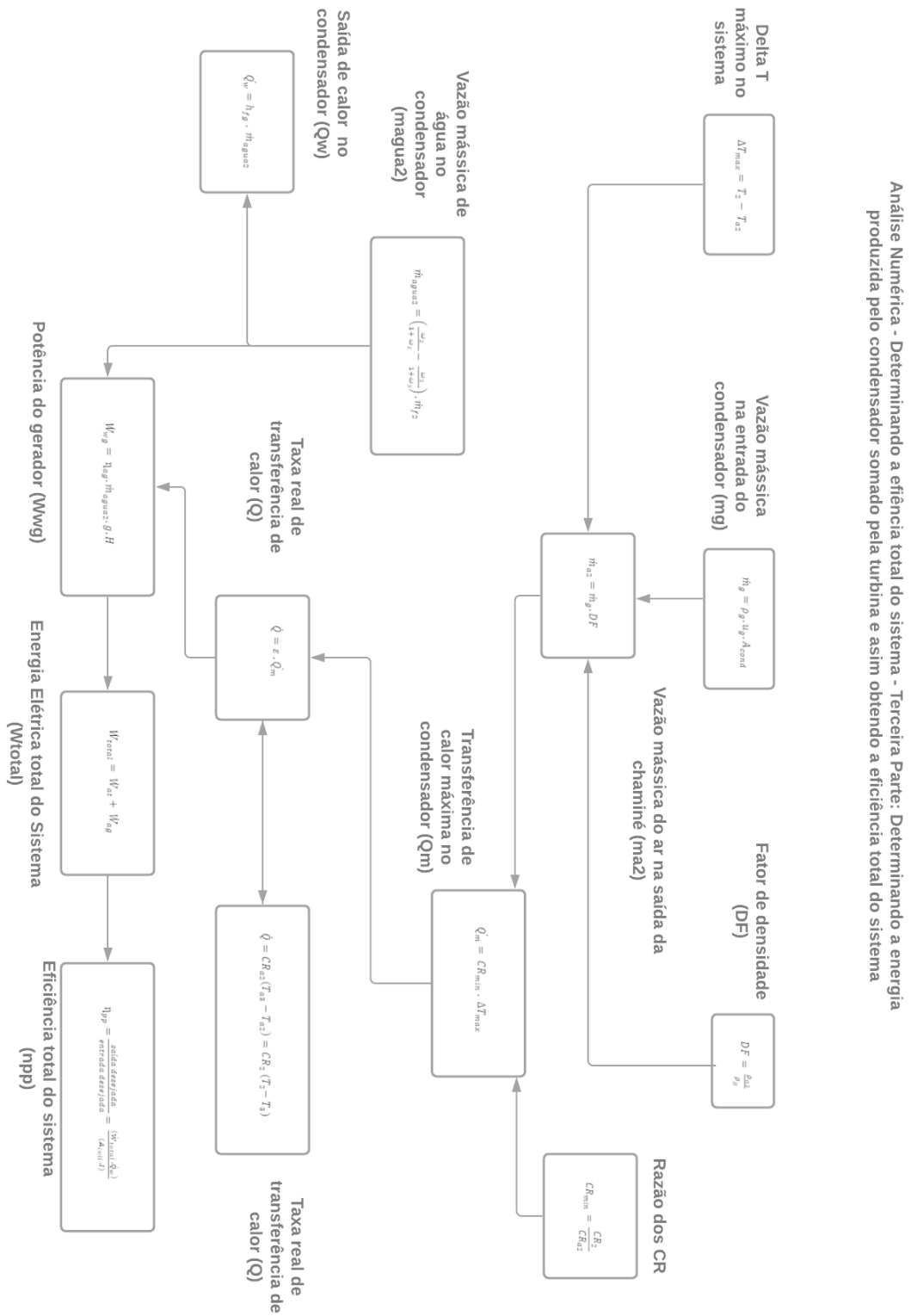
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 16: Fluxograma da análise numérica – Determinando a eficiência total do sistema – Primeira parte: Determinando a energia produzida pela turbin.



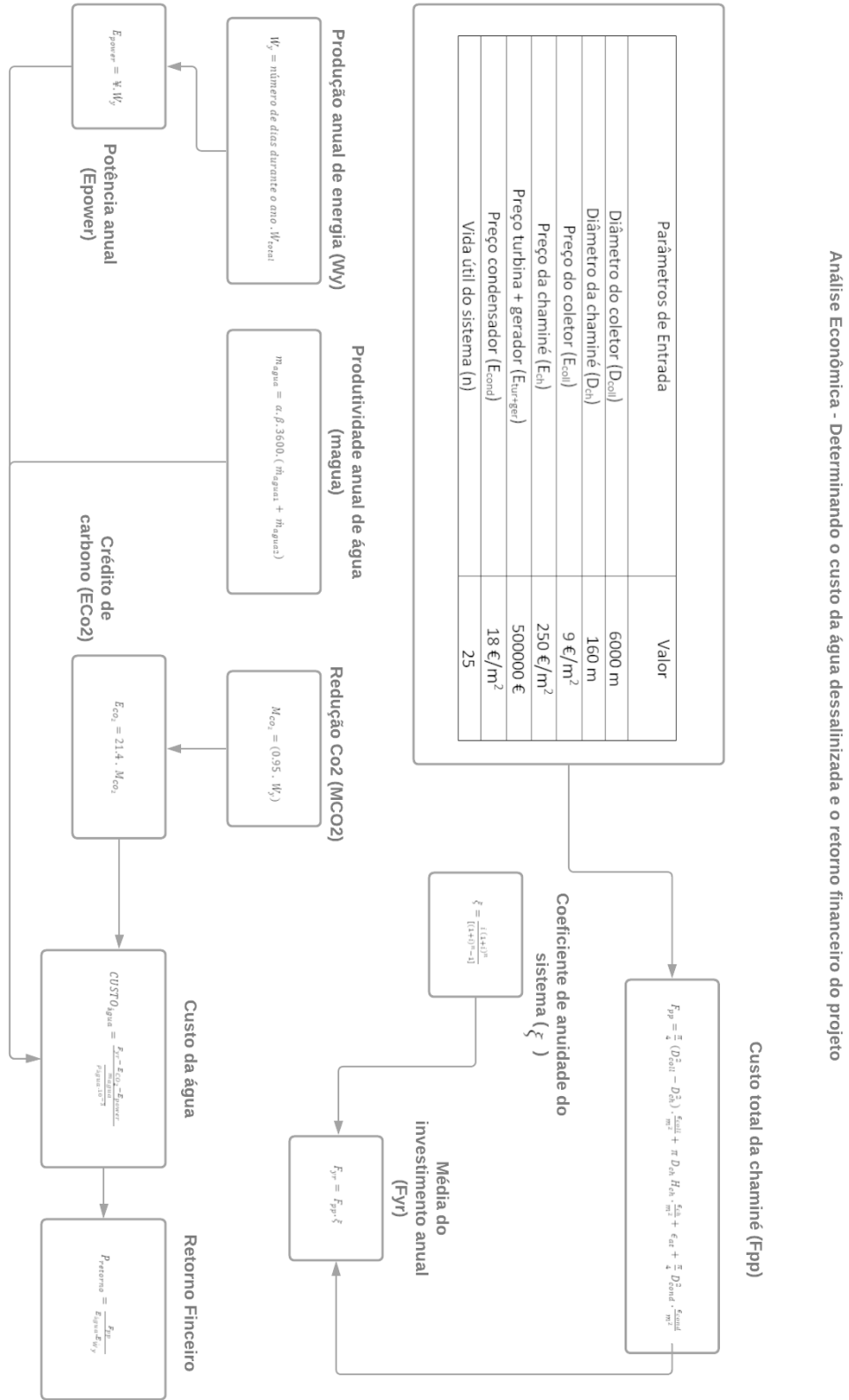
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 17 - Fluxograma da análise numérica – Determinando a eficiência total do sistema – Primeira parte: Determinando a energia produzida pelo condensador somado com a turbina e assim obtendo a eficiência total do sistema.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 18 - Segunda Parte: Fluxograma da análise Econômica – Determinando o custo de água dessalinizada e o retorno financeiro do projeto.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir dos cálculos apresentados nos fluxogramas deste trabalho foi construído a Tabela 2, tabela esta que apresenta os parâmetros do estudo e os resultados coletados e estimados a partir do modelamento matemático expresso na fundamentação teórica deste trabalho. A potência de saída fornecida é para a planta proposta é considerada ativa por 24 horas por dia, durante um período de um ano completo.

Tabela 2 – Parâmetros de entrada e resultados numéricos da chaminé solar para dessalinização de água e geração de energia elétrica

Parâmetros de Entrada e Resultados Numéricos da Chaminé Solar para Dessalinização de Água e Geração de Energia Elétrica			
Parâmetros de entrada	Valor	Parâmetros Calculados	Valor
Diâmetro do coletor (m)	6000	Vazão mássica do ar de operação na saída da chaminé (kg/s)	143204
Altura da chaminé (m)	500	Temperatura do ar no ambiente entrada do condensador (°C)	14,80
Raio da chaminé (m)	80	Pressão atmosférica na saída da chaminé (kpa)	95,15
Temperatura do ar na entrada da chaminé (°C)	49,50	Vazão mássica do ar ambiente na entrada do condensador (kg/s)	164513
Velocidade do ar na entrada da chaminé (m/s)	6,93	Vazão mássica de vapor condensado no condensador (kg/s)	2971
Diâmetro do condensador (m)	160	Pressão atmosférica na saída do condensador (kpa)	94,25
Efetividade do condensador (%)	90	Potência elétrica produzida na saída da turbina eólica (MW)	34,20
Parâmetros Calculados	Valor	Potência elétrica produzida na saída do gerador (MW)	13,11
Vazão mássica contendo vapor de água na entrada da chaminé (kg/s)	8401	Potência total de saída (MW)	47,31
Vazão mássica do ar de operação na entrada da chaminé (kg/s)	164513	Saída de calor do vapor condensado no condensador (kg/s)	9025774
Vazão mássica de vapor condensado na chaminé (kg/s)	994	Eficiência do sistema (%)	38,50
Velocidade do ar na saída da chaminé (m/s)	7,01		

Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir dos dados calculados e disponíveis na Tabela 2, foi criado um modelo matemático feito por software (MATLAB) para prever, estimar e analisar o desempenho de todo o sistema, bem como a análise econômica referente a sua construção.

5 RESULTADOS

Este capítulo será subdividido em duas seções em que a primeira deeste será abordada os resultados da análise numérica das suas principais variáveis; na segunda parte será abordada a análise econômica deste sistema.

5.1 Análise numérica das principais variáveis

Para realizar a análise numérica as variáveis a serem avaliadas neste trabalho foram redivididas nesta seção em três grupos. O primeiro destes envolve os resultados relacionados a localização geográfica da chaminé, assim sendo as variáveis da radiação na qual a chaminé solar é exposta bem como a velocidade do vento na entrada da chaminé foram avaliados. O segundo grupo é referente a análise dos resultados dos parâmetros que envolvem as dimensões das estruturas físicas da chaminé sendo estes os parâmetros relacionados a altura e o raio da chaminé e o raio do coletor. Por fim, o terceiro grupo refere-se a análise em relação as eficiências que englobam este sistema, sendo elas a eficiência da turbina eólica, do gerador e a eficiência total deste.

Para este capítulo todos os itens apresentados foram recalculados propondo a variação de alguns parâmetros, partindo da configuração padrão aqui descrita. Para cada variação, todas as outras grandezas permaneceram as mesmas, a fim de demonstrar apenas a influência de cada variável estudada.

5.1.1 Parâmetros diretamente relacionados com a localização geográfica da chaminé

Atualmente existem diversas configurações que combinam o uso de chaminés solares tendo como finalidade a obtenção da dessalinização de água e energia elétrica. Estudos como Zuo e outros (2021), Marinho Júnior e outros (2020), Zuo e outros (2019), Rahbar e Riasi (2019), Zuo e outros (2018), Yosif (2014) e Zhou e outros (2011) comprovam que a radiação solar é um dos principais parâmetros que determinam a eficiência deste sistema. Desta forma quanto maior for a incidência solar neste, maior e mais rápido também serão as temperaturas alcançadas no interior do dispositivo, obtendo assim uma influência direta na potência de saída deste.

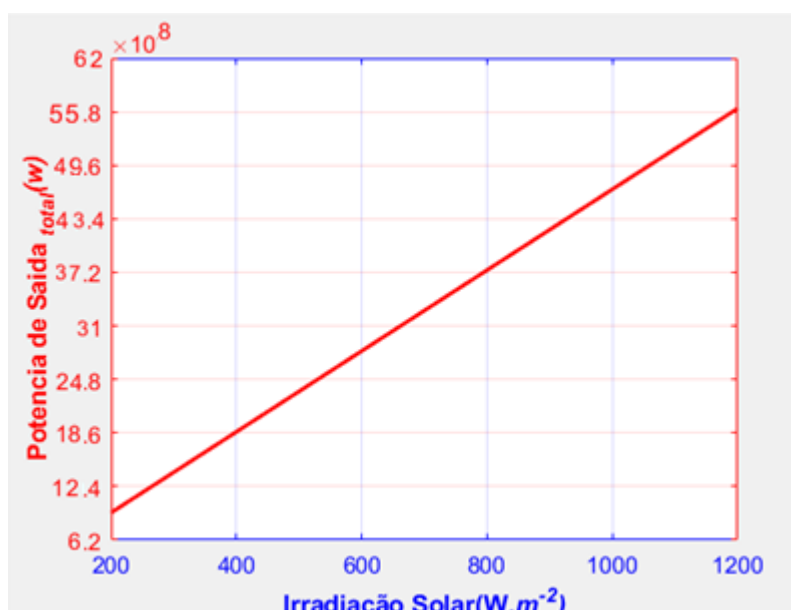
5.1.1.1 Radiação Solar

A radiação solar atmosférica calculada para este trabalho leva em conta o valor médio de tempo equivalente a 24 horas (86400 segundos) na localização geográfica do município de Belo Horizonte, Minas Gerais, sendo assim a resultante de radiação solar obtêm um valor aproximado de 384W/m^2 . Apesar da localização geográfica utilizada para este trabalho no que refere aos dados de radiação estar a aproximadamente a 50km de diferença do local estudado (distância aproximada entre Belo Horizonte e Brumadinho) para obter uma maior confiabilidade dos resultados optou-se por utilizar como dado de entrada a radiação solar calculada pela média do dia médio de cada mês determinado pelo ano padrão da SWERA. Para isso, é importante destacar que os valores de radiação solar calculados a partir do ano padrão estabelecido pela SWERA passam a ter uma coerência muito maior com a realidade, uma vez que, para estabelecer os mesmos valores foram estudados em média 23 anos de radiação solar sobre um determinado local, estudos esses que envolveram a cidade de Belo Horizonte e não envolveram a cidade de Brumadinho, por isso da determinação dos valores de radiação serem determinados a partir de Belo Horizonte.

A fim de se obter uma análise comparativa sobre os resultados e os parâmetros obtidos neste trabalho uma extensa revisão bibliográfica foi feita, principalmente no que se refere como os valores de entrada da radiação solar tal como a potência de saída e a eficiência deste. Esta revisão se deu primordialmente a esses parâmetros uma vez que, esses valores são largamente dependentes da radiação exercida sobre a localização geográfica do sistema.

Sendo assim, foi observado que em estudos numéricos como este é comum que na literatura o dado de entrada de radiação solar utilize valores entre 800W/m^2 e 1000W/m^2 para tentativa de padronização do valor de radiação solar exercida sobre todo o globo terrestre. A grande maioria dos trabalhos disponíveis na literatura (Sary e Syuhada, 2021; Chu e outros, 2021; Zuo e outros, 2019; Zuo e outros, 2018^a, Zuo e outros, 2018^b; Fateh, 2014; Zuo e outros, 2011; Zhou e outros, 2010; Haaf, 1984) utilizaram valores nesta faixa como referência. Desta forma, analisando a Equação (43) disposta neste trabalho um estudo comparatório foi feito avaliando a influência da potência de saída do sistema a partir da faixa de valores dispostos para radiação solar, variação essa determinada pela faixa de valores entre 200W/m^2 a 1100W/m^2 como apresentado na Figura 19:

Figura 19: Variação da potência elétrica total produzida pela radiação solar no sistema.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para este sistema, parte do componente de radiação solar incidente é absorvido pelo coletor solar e transferido por convecção de calor para o ar sob o coletor. A superfície de água a ser dessalinizada disposta sob o coletor aquece e transfere o vapor radialmente, escoando para fora da chaminé. Dessa forma, quanto maior for a radiação disponível para o sistema, maior também será a potência produzida pelo mesmo. Assim como disposto na Figura 19, analisando isoladamente a dependência do aumento da radiação solar no sistema, este levou a um aumento na energia elétrica total e a um aumento adicional na potência de saída exercida pela chaminé solar.

Em dados numéricos mensais, ao obter o valor médio de $384W/m^2$ para radiação solar do sistema a potência de saída total do mesmo equivale a um valor aproximado de 1466,61MW. Comparando o sistema estudado com os sistemas propostos na literatura de Yosif (2014) onde este obtêm um valor aproximado de 1674MW e Zhou e outros (2010) que obtêm um valor aproximado de 1705MW, sendo estes dois estudos feitos para uma chaminé solar de mesma dimensão e com a mesma finalidade, apenas em localizações geográficas diferentes o valor o valor calculado se comprova na mesma ordem de grandeza. Por sua vez, os estudos de Yosif (2014) e Zhou e outros (2010) o valor de radiação solar proposto é de $1000W/m^2$, valor este amplamente usado pela literatura mas, um tanto quanto distante da realidade.

A relação entre a potência elétrica total produzida pela radiação solar no sistema é um

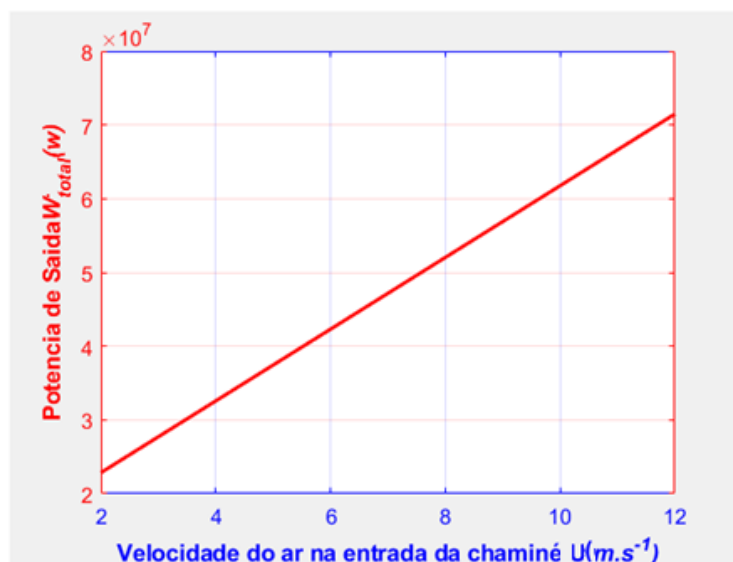
dos estudos mais relevantes ao que se refere ao processo de dessalinização de água e obtenção de energia elétrica apresentado (Zuo e outros, 2021).

5.1.1.2 Velocidade do vento na entrada da chaminé

A velocidade dos ventos laterais na chaminé influenciam diretamente o desempenho desta por perda de calor por convecção a partir da superfície exterior do coletor para o ambiente, por arasto do ar aquecido para fora do coletor e por arrasto gerando um efeito de sucção na saída da torre.

Para este trabalho a velocidade do vento na entrada da chaminé é de 6,93m/s, conforme mostrado na Tabela 2, valor este obtido a partir dos dados do mapa solar da SWERA para a cidade de Brumadinho. A Figura 20 mostra a relação entre a velocidade do vento na entrada da chaminé e a energia elétrica total produzida a partir do sistema.

Figura 20: Variação da potência elétrica total produzida pela velocidade do vento na entrada da chaminé.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir da Figura 14 é possível observar que o valor calculado para a potência de saída do dispositivo (47,31MW) é observado para a velocidade do vento na entrada da chaminé a 6,93m/s.

Assim como explicado na literatura por Castro Silva (2018), com o aumento da velocidade do vento, a velocidade do escoamento de ar aumenta. Este comportamento pode

ser explicado pelo aumento do escoamento de massa que entra no sistema. Como pode ser observado a velocidade do vento ocasionou um aumento de aproximadamente 48,38% quando aumentada a velocidade de 6,93m/s para 12m/s.

5.1.2 Parâmetros diretamente relacionados às dimensões estruturais físicas da chaminé

Desde a primeira construção de um protótipo de chaminé solar feito por Schlaich em 1968 diversas estruturas, composições e dimensões destes dispositivos vem sendo estudadas. Estudos como Zuo e outros (2021), Attig-Bahar e outros (2021), Chu e outros (2021), Zuo e outros (2019), Cheng e outros (2018), Zuo e outros (2018), Abujazar e outros (2016), Dsilva e outros (2016), Yosif (2014) e Zhou e outros (2011) investigaram a influência direta dos parâmetros dimensionais da chaminé em sua potência elétrica produzida bem como na eficiência do sistema.

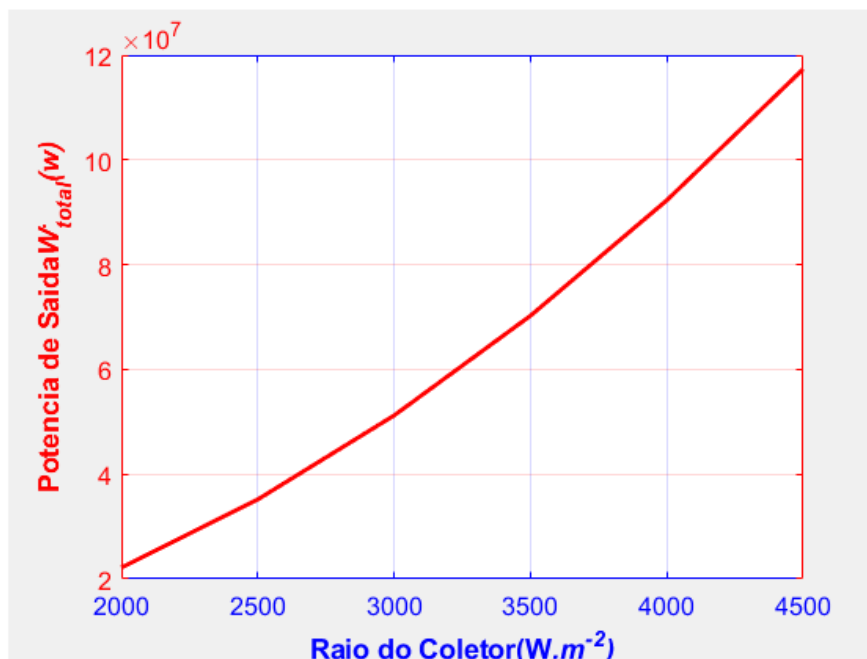
Desta forma quanto maior for a dimensão deste dispositivo, maior também será o volume de água dessalinizado bem como a produção energética feita por este. Em contrapartida, um dos grandes empecilhos para a larga aplicabilidade desta tecnologia é o fato do custo inicial para a construção deste quando em grandes dimensões ser elevado (Maia e outros, 2019). Sendo assim, é necessário gerir os custos de forma a conseguir grandes volumes de dessalinização de água bem como de geração de energia elétrica nas menores dimensões possíveis.

5.1.2.1 Raio do Coletor

As dimensões propostas para este dispositivo foram selecionadas a partir dos estudos numéricos de Yosif (2014) e Zhou e outros (2011) a fim de se poder validar e comparar os resultados obtidos.

Para isto, o raio do coletor solar investigado sofreu uma variação tendo como valores de diâmetros dimensões entre 2.000-4500m. Os valores obtidos para potência de saída em cada um desses raios são demonstrados na Figura 21:

Figura 21: Variação da potência elétrica total produzida pelo raio do coletor.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os modelos analíticos mais importantes para o coletor solar foram apresentados por Jing yin Li e Peng-Hua Guo (2012), Eltawil (2009), Beyers e outros (2002), El Haoun (2002), Gannon e Von Backström (2000), Schlaich (1995) e Haaf e outros (1983). A partir destes estudos e pesquisas foi possível observar que, para o coletor solar todos estes autores entraram em concordância com este trabalho aqui apresentado, onde os resultados indicam claramente que a produção total de energia aumentou à medida que o raio do coletor aumenta.

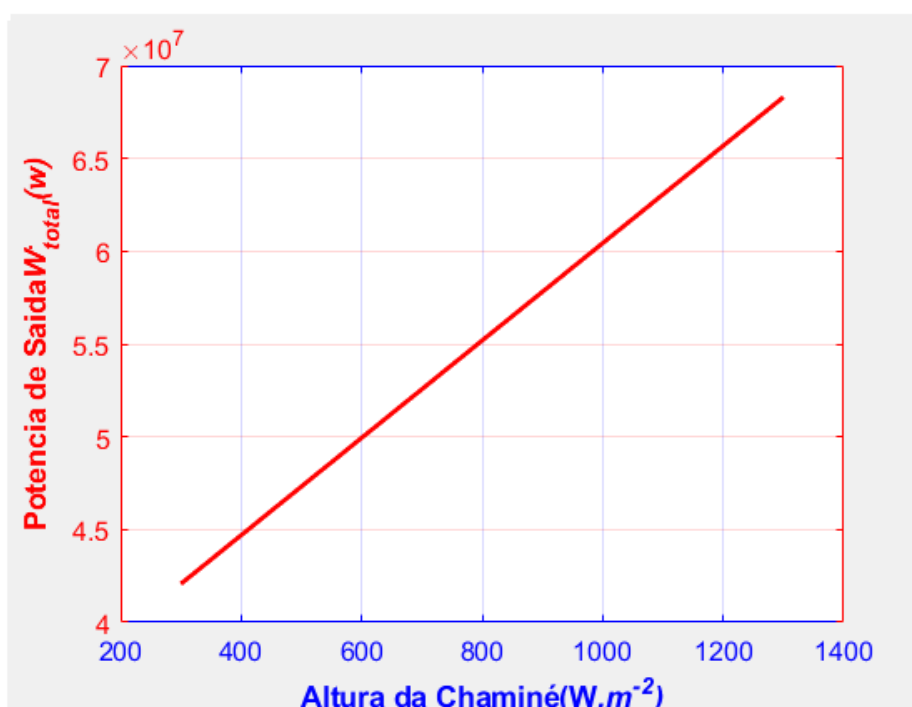
Para a chaminé estudada, um raio do coletor equivalente a 3000m se obtém como potência de saída o valor aproximado de 47,31MW. Para este dispositivo a área do coletor solar e a radiação solar atmosférica dominam sua eficiência. Um aumento do raio do coletor solar para 4500 metros por exemplo aumentaria a potência de saída em aproximadamente 133%, em contrapartida, o trabalho apresentado trata-se da grandeza de quilômetros de equipamentos e área livre para estrutura da chaminé, o que inviabilizaria o projeto.

5.1.2.2 Altura da Chaminé

A chaminé funciona como um motor térmico eficaz, criando um diferencia de temperatura entre o ar em sua entrada e saída. Por sua vez, a grande diferença de pressão disposta neste sistema cria o efeito de chaminé, que suga o ar da parte inferior da torre para o topo.

Para este trabalho a altura da chaminé da base até a entrada do condensador é de 500m, conforme mostrado na Tabela 2. Por estar relacionada diretamente com a energia elétrica produzida a partir do gerador, assim sendo, com a energia elétrica total produzida, a eficiência da planta aumentará conforme a altura da chaminé é aumentada, fato este que pode ser observado a partir da Figura 22:

Figura 22: Variação da potência elétrica total produzida pela altura da chaminé.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resultados obtidos neste trabalho indicam que um aumento na altura da chaminé acarreta um aumento na diferença de pressão entre o ar ambiente e o ar da chaminé, o que está de acordo com a literatura de Yosif (2014) e Jing-yin Li e outros (2012).

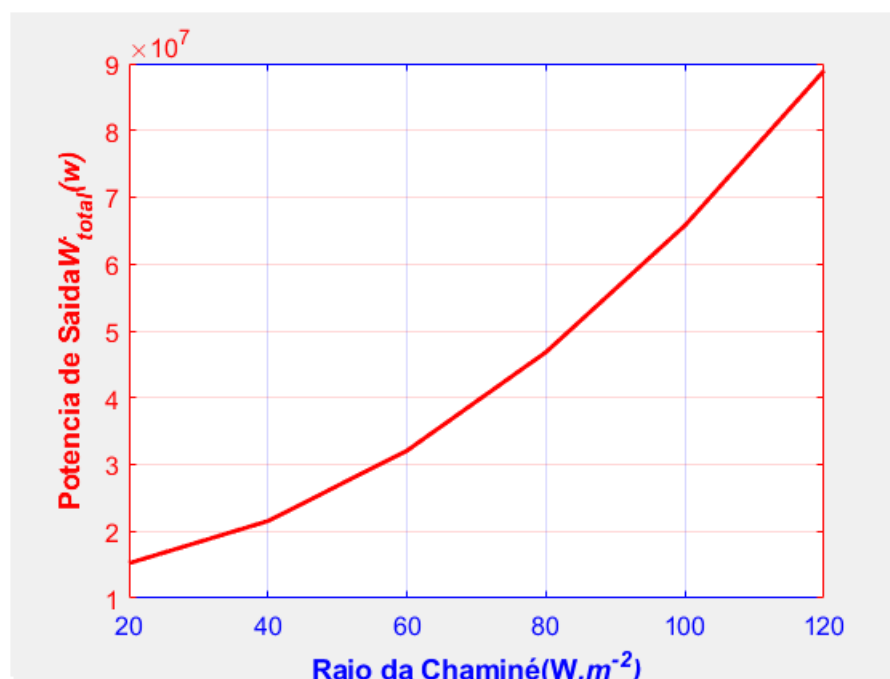
Para a chaminé estudada, a altura da chaminé resulta em uma potência de saída o

valor aproximado de 47,31MW, valor este que aumenta em cerca de 27% se dobrado o valor de sua altura para 1000 metros. Em relação a altura da chaminé, apesar de aumentos consideráveis a este projeto serem possíveis, limitações no atual desenvolvimento do concreto armado limitariam a possibilidade real do projeto (Marinho e outros, 2020).

5.1.2.3 Raio da Chaminé

Os parâmetros como a potência, a vazão mássica do ar de operação que passa através da chaminé, a energia elétrica total produzida e a quantidade de água produzida estudados para a chaminé proposta são diretamente dependentes do valor do seu diâmetro, sendo diretamente afetados pela área da chaminé. A relação entre o raio da chaminé e a potência elétrica total produzida pelo dispositivo é apresentado na Figura 23:

Figura 23: Variação da potência elétrica total produzida pelo raio da chaminé.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Dessa forma, para o caso estudado à medida que o raio da chaminé aumenta, a produção total de energia elétrica aumenta, aumentando também a sua eficiência. Para o caso estudado, em uma chaminé com o raio aplicado de 80m a potência de saída do sistema deu-se em aproximadamente 47,31MW.

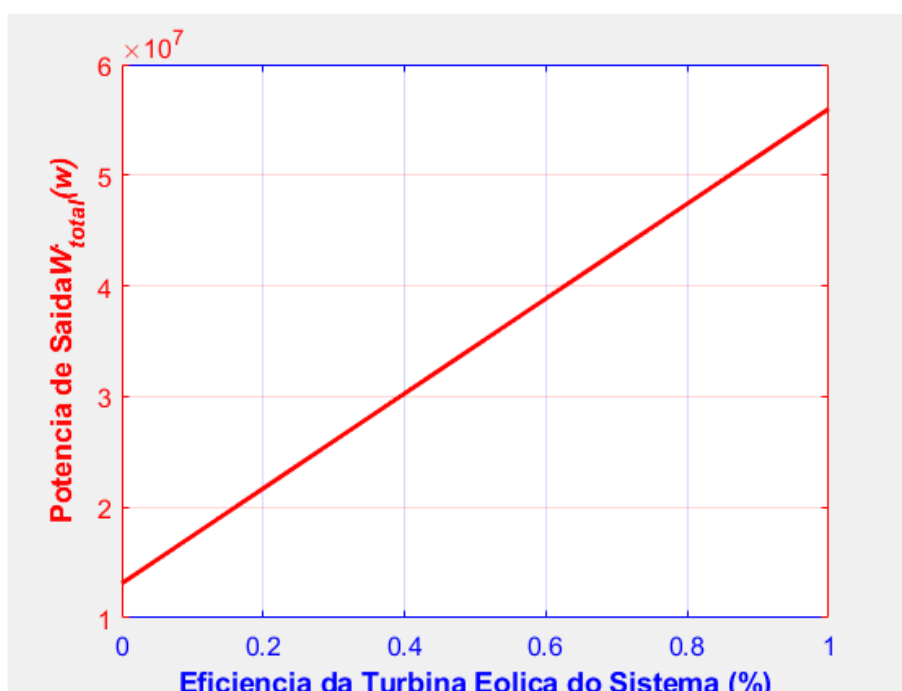
5.1.3 Parâmetros diretamente relacionados as eficiências do sistema

No sistema estudado, a produção energética acontece em dois momentos. Inicialmente pela obtenção de energia gerada na turbina disposta no centro do dispositivo e, em um segundo momento no gerador disposto do lado de fora da chaminé, por onde a água já dessalinizada é direcionada a fim de movimentá-lo e gerar energia. Dessa forma a soma dessas duas produções obtêm-se a produção total de energia elétrica feita pelo sistema.

5.1.3.1 Eficiência da turbina

Schlaich e outros (1995) recomendam que a efetividade da turbina seja igual a 80% conforme definido neste estudo, a fim de avaliar a influência deste parâmetro, foi analisado a partir da Equação (28) disposta neste trabalho uma variação dos valores desta eficiência na faixa de 0 a 100%. Desta forma a Figura 24 demonstra a relação entre a potência elétrica total produzida pela eficiência da turbina eólica do sistema:

Figura 24: Variação da potência elétrica total produzida pela eficiência da turbina eólica.



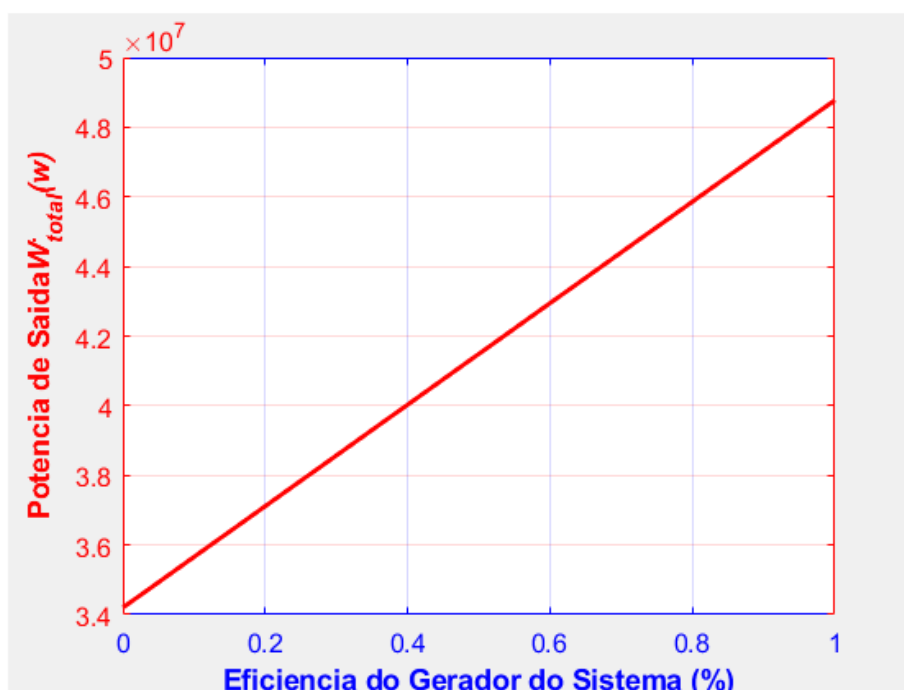
Fonte: Elaborado pelo autor.

A efetividade da turbina é o parâmetro mais importante para a produção de eletricidade (Yosif, 2014). A partir da Figura 18 pode ser visto que a energia elétrica total varia linearmente com a eficiência da turbina de ar. Sendo que, para o sistema estudado, em uma eficiência da turbina eólica de 80%, o valor da potência de saída do sistema se aproxima de 47,31MW.

5.1.3.2 Eficiência do gerador

A eficiência do gerador proposto para este trabalho é assumida como 90% Schlaich e outros (1995), para este estudo, foi analisado a partir da Equação (40) disposta neste trabalho uma variação dos valores desta eficiência na faixa de 0 a 100% . A Figura 25 demonstra a relação entre a potência elétrica total produzida pela eficiência do gerador do sistema.

Figura 25: Variação da potência elétrica total produzida pela eficiência do gerador.



Fonte: Elaborado pelo autor.

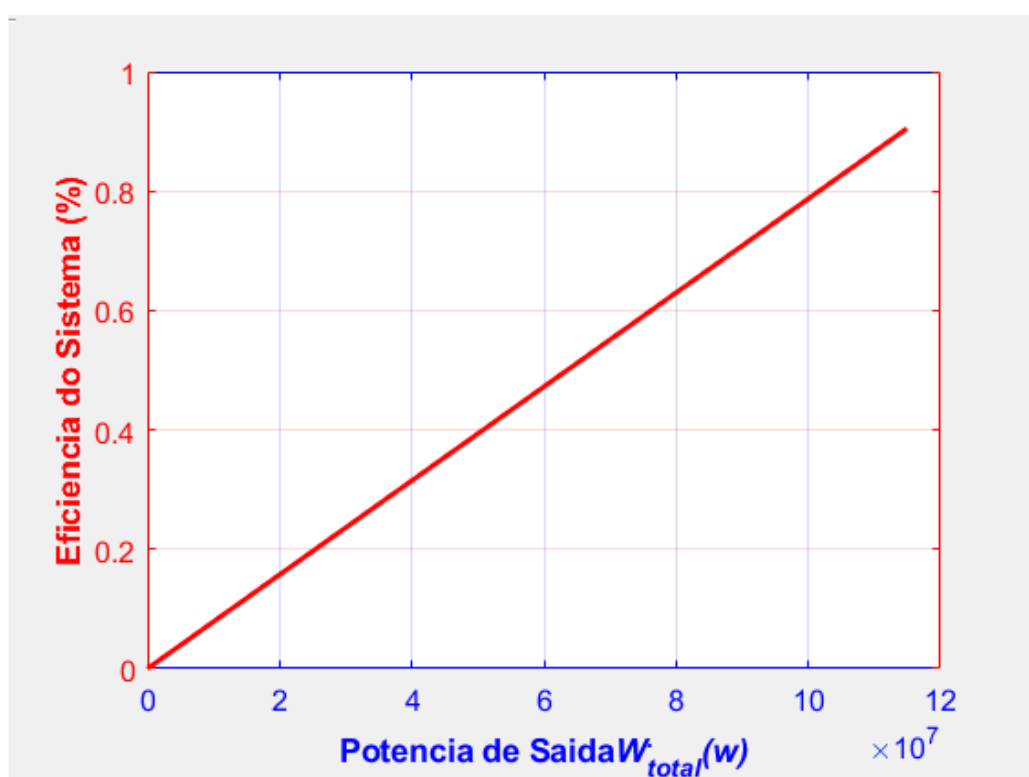
O aumento na energia elétrica total observado a partir da potência de saída na Figura 19 é proporcional ao aumento na eficiência do gerador. Sendo que, para o sistema estudado, em uma eficiência do gerador de 90%, o valor da potência de saída do sistema se aproxima

de 46,01MW.

5.1.3.3 Eficiência total do sistema

Assim como dito anteriormente, a energia elétrica total produzida na chaminé solar proposta é representada a partir da soma da energia elétrica produzida pela turbina localizada na base da chaminé e pela energia gerada pelo gerador localizado na parte externa da torre da chaminé solar. A adição destas duas produções energéticas resumem os parâmetros mais importantes neste tipo de usina (Yosif, 2014; Zhou e outros, 2011). Sendo assim, para este estudo, foi analisado a partir da Equação (43) disposta neste trabalho uma variação dos valores de sua eficiência na faixa de 0 a 100% o resultado desta produção de potência elétrica total produzida em relação a eficiência total no sistema é demonstrado na Figura 26:

Figura 26: Variação da potência elétrica total produzida pela eficiência total do sistema.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O aumento na energia elétrica total observado a partir da potência de saída na Figura 20 é proporcional ao aumento na eficiência do gerador. Sendo que, para o sistema estudado, tendo uma potência de saída do próxima de 47,31MW a eficiência deste sistema obtêm um valor aproximado de 39,33%.

1.1 Análise econômica

O crescimento acelerado da demanda global por energia em todas as áreas industriais, o rápido esgotamento dos combustíveis fósseis em todo o mundo somado aos seus efeitos nocivos sobre o aquecimento global e as mudanças climáticas são inegáveis. Esperançosamente, estes problemas globais foram recentemente conhecidos pela grande maioria dos governos e pesquisadores como um dos maiores problemas ambientais existentes em nosso planeta. Desta forma, fornecer uma alternativa sustentável para obtenção energética tem se transformado em uma missão mundial para os governantes e pesquisadores de todo mundo (Sheikhnejad e outros, 2021).

A energia solar que atinge diretamente a superfície da Terra contém cerca de 1.8×10^{11} MW, valor este que é muitas vezes maior do que o presente consumo energético consumido hoje no planeta Terra (Terol, 1978).

Desta forma, a configuração aqui estudada de chaminé solar para dessalinização de água e obtenção de energia elétrica se torna significativamente valiosa para a produção de energia e obtenção de água potável a ser usada tanto pelo setor público como pelo setor industrial. Por esta razão ela passa a merecer uma ampla análise econômica dos benefícios de seu uso em comparação com outros sistemas de dessalinização solar (Yosif, 2014).

Os principais modelos de custos feitos para chaminés solares de grande porte utilizados para este trabalho foram anteriormente propostos por Attig-Bahar e outros (2021), Azad e outros (2021), Guo e outros (2021), Yosif (2014), Zuo e outros (2011), Fluri e outros (2009) e Schlaich (1995).

A fim de solucionar a questão energética mundial, muitos países ao redor do mundo desenvolveram planos para gerar uma certa porcentagem de sua capacidade elétrica a partir de recursos feitos por energia renovável (Talavera e outros, 2007). Para isto muitas etapas econômicas importantes passaram a ser implementadas em projetos com esse viés, a fim

de atingir altos percentuais de descontos nas construções destes, incluindo exemplos como a concessão de empréstimos bonificados para comprar e instalar estes sistemas, isenção em programas de impostos e o pagamento por um preço unitário da eletricidade produzida e fornecida à rede elétrica principal da região mais caro, deixando a energia renovável como melhor escolha a ser consumida pelo cliente final (Fluri e outros, 2009; Talavera e outros, 2007).

Como os custos de operação e manutenção são considerados baixos para esses projetos movidos a energia solar; portanto, um grande número de países está apoiando esses projetos economicamente (Zuo e outros, 2011).

Para este trabalho, de acordo com a literatura de Azad e outros (2021), Yosif (2014), Zuo e outros (2011) e Zhou e outros (2011), a partir de uma adequação correta para da cotação do euro em real, tendo como data base o dia de 13 de agosto de 2021 (1 Euro (€) = 6.18 Real Brasileiro (R\$)), foi adotado um sistema de preços que contribuiu a simplificação dos cálculos no processo de análise econômica do sistema estudado, onde os valores referentes a cada um dos sistemas isolados (valores necessários para a resolução da Equação 47 deste trabalho) adotados neste trabalho são apresentados na Tabela 3:

Tabela 3: Sistema de preços dos dispositivos adotados para a análise econômica deste trabalho.

Dispositivo da Chaminé Avaliado	Valor Adotado	
	Euro (€)	Real (R\$)
Chaminé (Torre)	250/m ²	1545/m ²
Turbina Eólica + Gerador	500000	3090000
Coletor Solar	9/m ²	55,62/m ²
Condensador	18/m ²	111,24/m ²

Fonte: Elaborado pelo autor.

Ainda de acordo com a Azad e outros (2021), Yosif (2014), Zuo e outros (2011) e Zhou e outros (2011) os preços apresentados na Tabela 3 incluem o preço do material, o preço da transferência do material até o local de instalação e o preço de construção.

Algumas outras considerações foram importantes para este trabalho, o preço da energia considerado para este trabalho foi de 0.62R\$/kWh, valor este disponibilizado como base de cálculo da CEMIG tendo como base de consulta o dia de 13 de agosto de 2021.

Por sua vez, o valor do crédito de carbono também é importante para a análise econômica deste trabalho, ao que se é utilizado a partir da Equação 54. Sendo assim, de acordo com o *Financial Times*, no ano de 2021 o preço do crédito de carbono devido à adoção de políticas ambientais mais rígidas adotados pela Europa, bateu recorde no mercado mundial, ultrapassando os 56.04 euros por tonelada.

Dessa forma, como resultados da performance econômica da chaminé solar para dessalinização de água e obtenção de energia elétrica tendo a operação de sua matriz com diferentes quantidades de horas diárias obteve-se os resultados dipostos na Tabela 4:

Tabela 4: Comparação econômica do desempenho da chaminé solar com diferentes períodos de operação.

Parâmetros	Tempo de funcionamento durante um dia					
	5	6	7	8	9	24
Potência de Saída (kWh/ano)	3582322,917	4298787,5	5015252,083	5731716,667	6448181,25	17195150
Receita de Eletricidade (€/ano)	358232,2917	429878,75	501525,2083	573171,6667	644818,125	1719515
Receita de Eletricidade (R\$/ano)	2206710,917	2648053,1	3089395,283	3530737,467	3972079,65	10592212,4
Redução da Emissão de CO ₂ (ton/ano)	3403206,771	4083848,125	4764489,479	5445130,833	6125772,188	16335,3925
Receita de CO ₂ (€/ano)	72828624,9	87394349,88	101960074,9	116525799,8	131091524,8	34957739,9
Produtividade de Água Dessalinizada (ton/ano)	26055897,3	31267076,76	36478256,22	41689435,68	46900615,14	125068307
Preço da Água Dessalinizada (€/m ³)	1,58627409	1,321848401	1,132972909	0,991316291	0,88113892	0,330530461
Preço da Água Dessalinizada (R\$/m ³)	9,803173874	8,169023119	7,00177258	6,126334675	5,445438528	2,04267825
Período de retorno financeiro da planta (anos)	53	51	49	33	30	14

Fonte: Elaborado pelo autor.

A Tabela 4 apresenta a produção anual de energia (valor referente a quantidade de energia produzida pela usina proposta), a receita anual de eletricidade (valor referente a quanto financeiramente a usina geraria para seu proprietário), a redução anual de emissões de CO₂, a receita anual de CO₂ (valor referente a quanto financeiramente a usina geraria para seu proprietário a partir da venda feita pelos créditos de carbono), a produção anual de água doce e o preço da água doce para diferentes horas de operação. A fim de se submeter a maior quantidade de comparações literárias possíveis o número de horas estabelecido para o funcionamento deste trabalho varia desde 5 horas de irradiação solar e funcionamento da usina (o que seria considerado como poucas horas trabalhadas em um dia para uma localização com altas médias de irradiação solar como a cidade de Brumadinho) bem como para 24 horas de irradiação solar e funcionamento da usina (o que apesar de se tratar de um dado irreal é também um dado largamente utilizado na literatura disponível para este tipo de trabalho).

Assim como o disposto pela literatura e análise de Attig-Bahar e outros (2021), Azad e outros (2021), Guo e outros (2021), Yosif (2014), Zuo e outros (2011), Fluri e outros (2009) e Schlaich (1995), se o tempo de operação da chaminé for tomado em horas diferentes a cada dia, os resultados estimados variam significativamente, tendo como a maior produção energética atingida para a planta em operação 24 horas por dia e todos os dias do ano em 17.20MWh/ano de produção energética e uma receita de 1,72M€/ano (equivalente a 10,59MR\$/ano) para esta mesma configuração. Por sua vez, passa-se a ter um valor de 3,58MWh/ano para produção energética e uma receita de 358,23k€/ano (equivalente a 2,20MR\$/ano) referente a menor produção energética atingida quando em operação em apenas 5 horas diárias em todos os dias do ano.

Da mesma forma, o custo da água a ser dessalinizada neste processo cai drasticamente a medida que se aumentam as horas trabalhadas na planta, tendo como resultado o preço de 2,04R\$/m³ e um volume de 125,07Mton/ano para a produção de água dessalinizada atingida quando a planta em operação 24 horas por dia e todos os dias do ano. Por sua vez a planta atinge um valor de 9,80R\$/m³ e um volume de 26,06Mton/ano referente a menor produção de água dessalinizada atingida quando em operação em apenas 5 horas diárias em todos os dias do ano.

Outro dado importante que pode ser avaliado a partir da Tabela 4 é o que se diz respeito ao período de retorno financeiro em relação ao gasto inicial do sistema e os custos

referentes a produtividade do mesmo em relação a suas horas de funcionamento. Com a planta operando nas 24 horas do dia é necessário um período de 14 anos para que o projeto se pague por completo gerando apenas lucros para o seu idealizador. Desta forma, a medida que se diminui as horas trabalhadas neste sistema o número de anos necessários a se pagar o projeto e ter um alto valor de lucro neste sistema também passa a aumentar significativamente, sendo este em 30 anos para a planta trabalhando 9 horas diárias, 33 anos para a planta trabalhando 8 horas diárias, 49 anos para a planta trabalhando 7 horas diárias, 51 anos para a planta trabalhando 6 horas diárias e 53 anos para a planta trabalhando 5 horas diárias.

Desta forma, assim como o esperado pela literatura de Attig-Bahar e outros (2021), Azad e outros (2021), Guo e outros (2021), Yosif (2014), Zuo e outros (2011), quanto maior for o tempo de operação da planta, mais rápido obtêm-se o retorno financeiro inicial, e mais rápido a planta passa a gerar apenas lucros ao seu idealizador.

De acordo com os dados da literatura Yosif (2014), Zuo e outros (2011) o valor obtido para dessalinização de água deste trabalho foi comparado com outros resultados de outros trabalhos que são apresentados na Tabela 5:

Tabela 5: Sistema de preços adotado para a análise econômica deste trabalho.

Energia	Preço/m ³
Coletor Solar	3.50£-8.00€
Fotovoltaica	3.14£-9.00€
Eólica	1.00£-5.00€
Convencional (Elétrica)	0.35£-2.79€

Fonte: Yosif (2014) - adaptado.

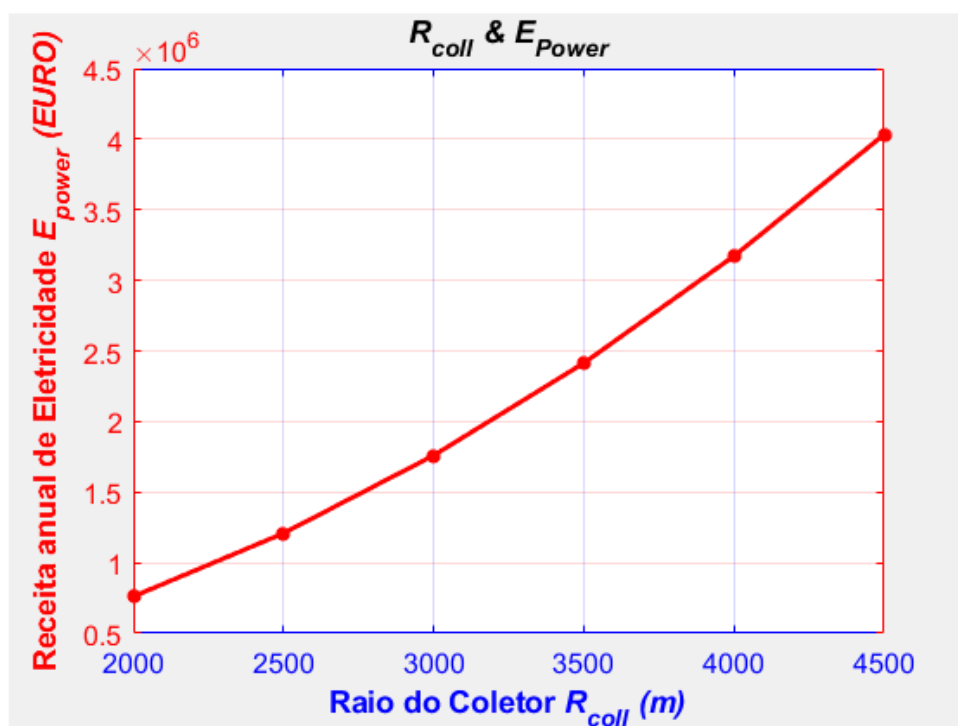
Dessa forma, o preço da água dessalinizada produzida pelo sistema de chaminé composto neste trabalho (preço este que varia entre 0.33£/m³ até 1.59£/m³; dependendo do número de horas em que a chaminé fica em operação) se encontra inferior a faixa de preço da água dessalinizada produzida por outros sistemas que funcionam com energia convencional e/ou sistemas de energia eólica. Desta forma, este sistema estudado tem absoluta capacidade de competir no mercado local.

Além dos resultados gerais propostos neste sistema como apresentado na Tabela 4, neste trabalho também foi avaliado a relação de custos caso se modifique parâmetros como: o tamanho do raio do coletor, altura da chaminé, vida útil do sistema e a vazão mássica total de vapor condensado na chaminé.

1.1.1 Raio do Coletor

O tamanho do coletor é a principal variável estrutural dominante na área da chaminé solar. Um aumento no diâmetro do coletor gera um aumento na produção de energia total anual do sistema. Dessa forma a receita anual de eletricidade pelo raio do coletor é apresentado na Figura 27:

Figura 27: Receita anual de eletricidade versus Raio do coletor.



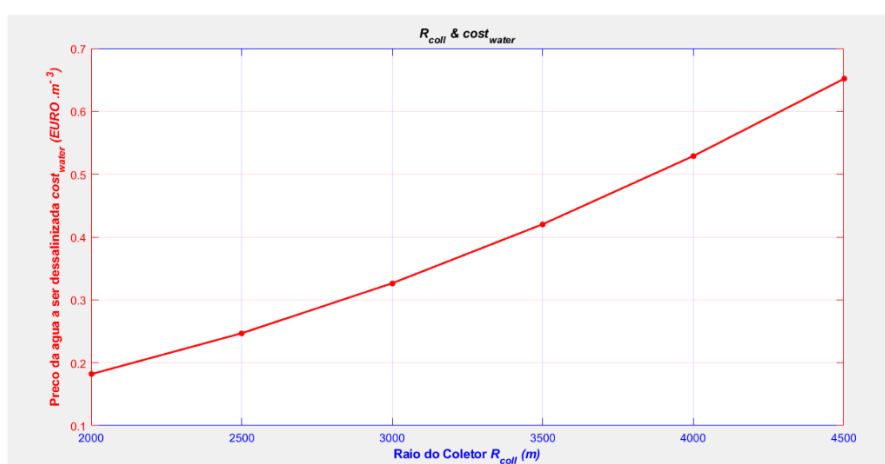
Fonte: Elaborado pelo autor.

Assim como apresentado na Tabela 4, para a chaminé estudada feita por um raio do coletor de 3000 metros, obtêm-se uma receita anual aproximada de eletricidade em euros de 1,72M€/ano (equivalente a 10,59MR\$/ano). Assim como esperado pelos estudos de

Attig-Bahar e outros (2021), Azad e outros (2021), Guo e outros (2021), Yosif (2014) e Zuo (2011), a medida que o raio do coletor é aumentado de tamanho, a receita anual da chaminé cresce consideravelmente, chegando a atingir quase o dobro do seu valor para um raio de 4000 metros.

Em contrapartida, o valor do custo da água a ser dessalinizada aumentará a medida em que o raio do coletor da chaminé também aumenta no sistema, como é demonstrado na Figura 28:

Figura 28: Preço da água dessalinizada versus Raio do coletor.



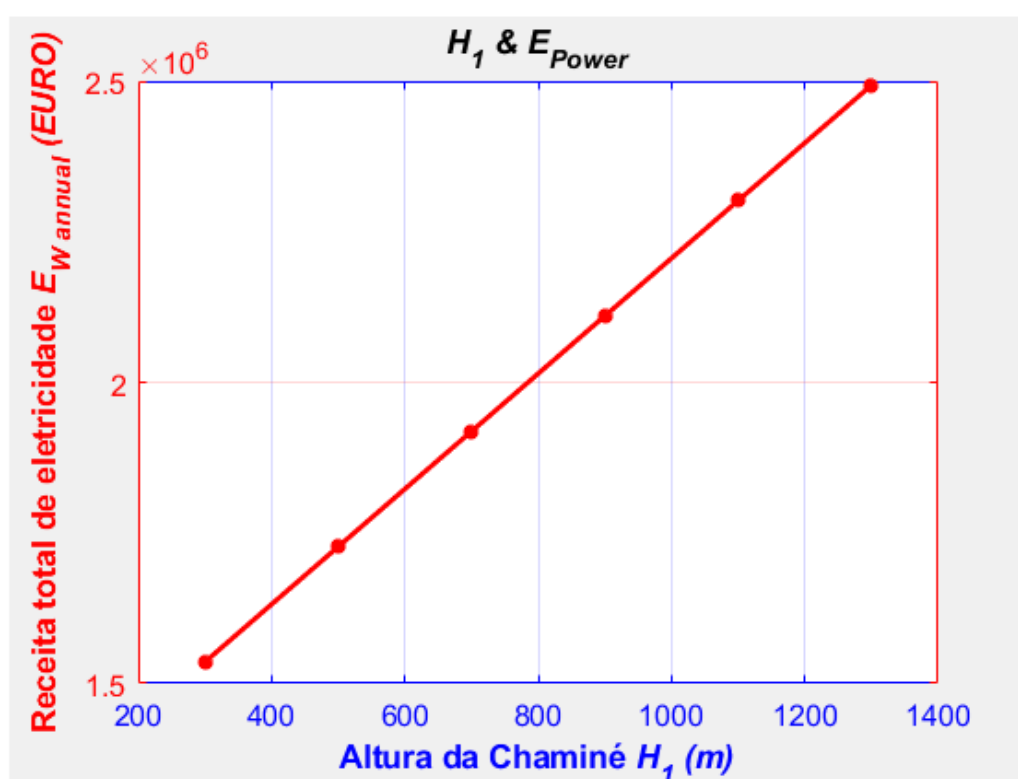
Fonte: Elaborado pelo autor.

Para o caso estudado, a partir de um raio do coletor com 3000 metros o preço final da água a ser dessalinizada na planta operando a 24 horas por dia nos 365 dias do anos obtêm o valor de 0,33€/ m³ (aproximadamente 2,04 R\$/m³). Como também pode ser visto na Figura 22 o preço anual da produção de água doce varia com o aumento do raio do coletor, isso acontece devido ao fato de que, o preço varia linearmente porque quanto maior for o raio maior, uma vez que, o custo financeiro do projeto aumenta proporcionalmente a sua dimensão física.

1.1.2 Altura da Chaminé

Assim como apresentado pela análise deste trabalho a altura da chaminé é um dos principais parâmetros para determinar a produção energética deste sistema. Sendo assim, o aumento na altura da chaminé leva a um aumento na produção anual total de energia, estes valores são demonstrados na Figura 29:

Figura 29: Receita anual de eletricidade versus Altura da Chaminé.

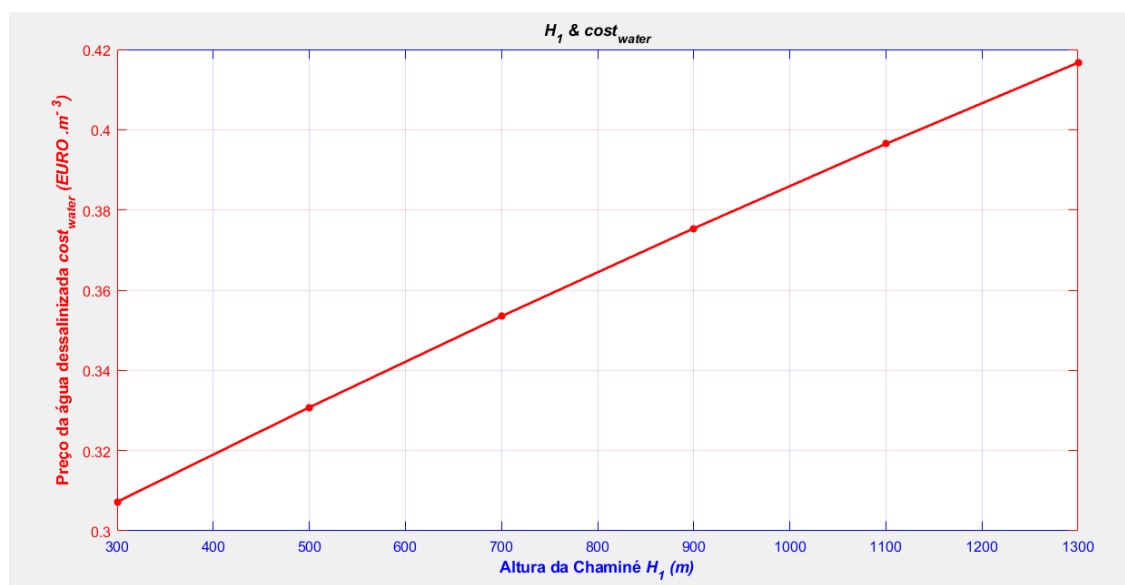


Fonte: Elaborado pelo autor.

Para a chaminé estudada feita por uma altura de 500 metros, obtêm-se uma receita anual aproximada de eletricidade em euros de 1,72M€/ano (equivalente a 10,59MRS\$/ano). Assim como esperado pelos estudos de Attig-Bahar e outros (2021), Azad e outros (2021), Guo e outros (2021), Yosif (2014) e Zuo (2011), a medida que a altura da chaminé é aumentada, a receita anual desta cresce consideravelmente, chegando a atingir um valor aproximado de 2M€/ano (equivalente a 12,32MRS\$/ano) quando feita com 800 metros de altura.

Em contrapartida, assim como acontece com o raio do coletor, o aumento da altura da chaminé também faz com que aumente o valor do custo da água a ser dessalinizada, essa relação é demonstrada na Figura 30:

Figura 30: Preço da água dessalinizada versus Altura da chaminé.



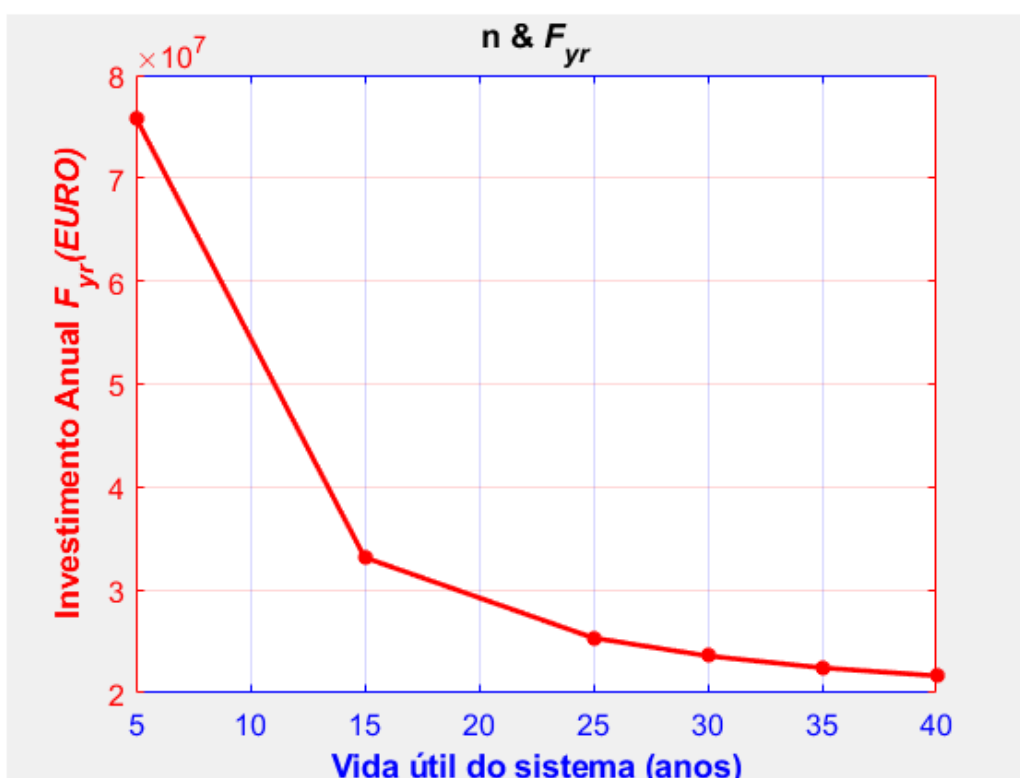
Fonte: Elaborado pelo autor.

Para o caso estudado, a partir de uma altura da torre de 500 metros o preço final da água a ser dessalinizada na planta operando a 24 horas por dia nos 365 dias do ano obtêm o valor de 0,33£/m³ (aproximadamente 2,04 R\$/m³). Como também pode ser visto na Figura 22 o preço anual da produção de água doce varia linearmente com o aumento da altura da coletor, isso acontece devido ao fato de que, quanto maior a altura da chaminé maior também será o custo que envolve a produção desta.

1.1.3 Vida Útil do Sistema

A vida útil do sistema estudado é uma grandeza de grande importância para a análise econômica deste. O aumento dos anos de vida útil afeta o aumento do coeficiente de anuidade, assim como mostrado na Equação (46) deste trabalho. A partir desta, foi proposto uma variação do investimento anual pela vida útil deste sistema, o resultado é apresentado na Figura 31:

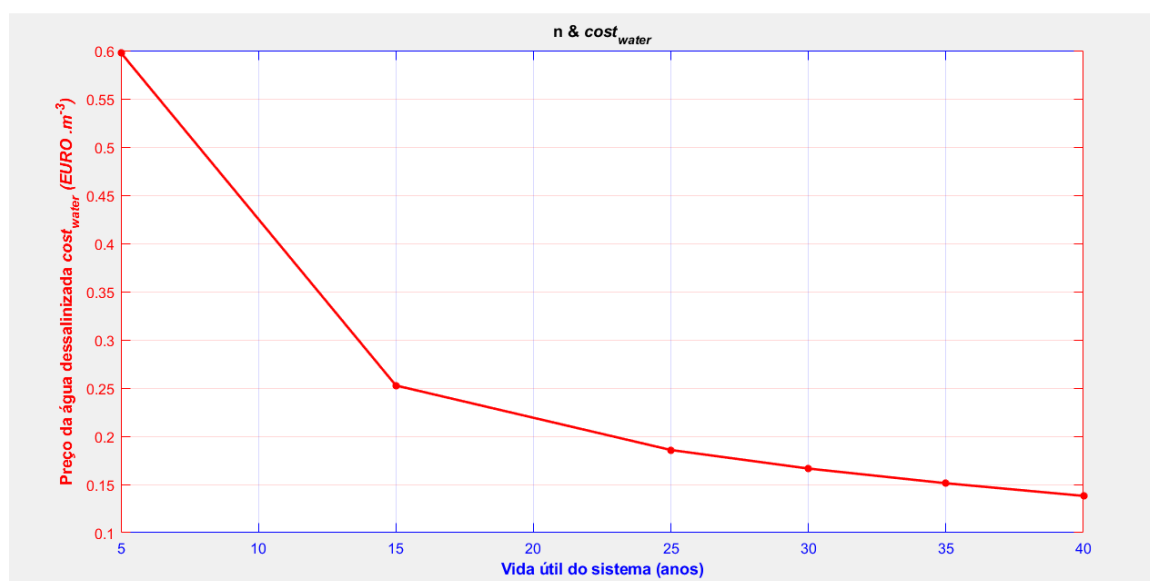
Figura 31: Variação do investimento anual versus Vida útil.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para o caso estudado, o investimento inicial feito no sistema nos primeiros cinco anos chega próximo 76M€/ano (aproximadamente 46,81MR\$/ano), caindo drasticamente a cada ano utilizado como apresentado na Figura 25. Após 40 anos de funcionamento este investimento é reduzido a quase 29% deste valor apresentado para os cinco primeiros anos.

Por sua vez a relação do preço da água a ser dessalinizada pela chaminé solar em relação a vida útil do sistema é demonstrada na Figura 32:

Figura 32: Preço da água a ser dessalinizada x Vida útil.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para o caso estudado, assim como acontece no investimento inicial feito no sistema preço da água a ser dessalinizada cai drasticamente, iniciando nos cinco primeiros a um valor próximo a $0,60\text{€}/\text{m}^3$ (aproximadamente $3,70\text{ R\$}/\text{m}^3$) até alcançar o valor calculado de $0,33\text{€}/\text{m}^3$ (aproximadamente $2,04\text{ R\$}/\text{m}^3$) com aproximadamente 12 anos de funcionamento e $0,14\text{€}/\text{m}^3$ com 40 anos de funcionamento.

6 CONCLUSÕES

Este trabalho se destinou a avaliar um sistema composto por uma chaminé solar combinada para dessalinização de água e geração de energia elétrica utilizando o software MATLAB e de modelos presentes na literatura. O principal objetivo deste trabalho foi determinar o valor de potência de saída e o volume de água a ser dessalinizado neste processo, além de avaliar os parâmetros geométricos que compõe este sistema.

A importância deste trabalho está relacionada a necessidade e importância do processo de dessalinização da água do rio Paraopeba na cidade de Brumadinho, Minas Gerais. Após o ocorrido nesta, ainda no ano de 2019, este rio se tornou completamente poluído por minério dentre diversos outros materiais ferruginos dispostos pelo processo de mineração. A necessidade de se dessalinizar este rio bem como de produzir fontes alternativas de energia para um país ainda tão dependente de chuvas em sua matriz energética têm se tornado um dos maiores desafios nacionais.

Avaliar, pesquisar e estimar a produtividade de fontes alternativas de energia renovável no Brasil bem como o processo de dessalinização de um rio de tão grande importância que vem a desaguar no rio São Francisco (rio este que é um dos mais importantes cursos d'água do Brasil e considerado o rio de integração nacional. Sua importância ultrapassa o abastecimento de água principalmente do Nordeste do Brasil, pois possui um grande valor econômico, social e cultural para o país, onde muitas famílias dependem dele para sobreviver) faz com que o impacto deste trabalho se torne ainda maior.

Um modelo matemático e econômico foi desenvolvido operando simultaneamente para a produção de água potável e energia elétrica. Além disso, alterações necessárias e dispostas pela literatura feitas a fim de solucionar o grande número de variáveis encontradas neste sistema foram feitas a fim de facilitar as soluções para que este funcione no nível de desempenho mais alto possível.

A partir destes estudos foi possível determinar que o sistema estudado tem a capacidade de produzir energia elétrica e dessalinização de águas salobras ao mesmo tempo, por isso passa-se a ser considerado na literatura como um sistema de produção com múltiplas saídas.

Para o sistema estudado a localização geográfica de aplicação deste foi investigada. Apesar de se tratar de uma chaminé solar de grande porte (contendo aproximadamente 6km de extensão em seu coletor solar) este sistema poderia vir a ser instalado na região de Córrego do Feijão em Brumadinho, região esta que foi amplamente afetada a partir do rompimento da Barragem 1 da VALE no ano de 2019 e, até a presente data desta publicação ainda não é aproveitada ou recuperada de forma correta. Logo, um grande benefício da aplicação da chaminé solar neste local é de que esta usa apenas terras não cultiváveis, não tendo nenhum impacto negativo ao meio ambiente, não destruindo os recursos naturais, não causando problemas de migração para o homem ou para os animais. Desta forma, a proposição de um sistema como este estudado passa a ser de grande importância para aumentar a eficiência e uso deste terreno, onde com a criação desse sistema, o fornecimento de energia e água potável aumentaria consideravelmente as áreas afetadas sendo de especial benefício para a localização proposta.

A partir do modelo matemático feito neste trabalho foi possível concluir que os resultados das variações dos parâmetros estimados, o desempenho deste sistema aumentou com a maioria dos parâmetros, para as dimensões projetadas o sistema em funcionamento conseguiu pagar o valor inicial nele disposto com uma média de 13 anos de funcionamento, uma vez que, a média de utilização disposta na literatura é de aproximados 40 anos, por 27 anos o sistema seria de completo e alto lucro a seus proprietários. Para isso os resultados econômicos foram obtidos com a implementação do modelo econômico do sistema baseados no preço da energia elétrica e no preço da dessalinização da água dispostos na literatura e calculados para Brumadinho, Minas Gerais.

Outra vantagem deste sistema é que este não precisa de luz solar direta, podendo operar com sucesso em condições climáticas que recebem apenas luz solar difusa ou refletida devido ao céu parcialmente ou totalmente nublado. O que seria uma grande vantagem energética em um estado como Minas Gerais, estado este tão amplamente dependente de chuvas para movimentação das usinas hidrelétricas, sendo esta a principal fornecedora de energia em sua matriz. Ainda na composição deste sistema, a energia eólica que movimenta a turbina interna deste é considerada intermitente, portanto a dependência deste tipo de sistema atrai desenvolvimento de curto e longo prazo.

Outra vantagem relacionada a este sistema é de que a construção deste é relativamente simples, uma vez que os materiais necessários para o processo de construção estão

prontamente disponíveis. A tecnologia de construção é amplamente conhecida e os custos de operação e manutenção estão nos níveis mais baixos possíveis.

Sendo assim, caso seja possível implementar este sistema de chaminé solar aqui proposto, ele fornecerá enormes benefícios sociais e econômicos a quem o implementar.

Conforme apresentado nesta dissertação, muitas propriedades e parâmetros interessantes deste sistema foram detalhados. Isso é particularmente excepcional e encorajador, dado o período relativamente curto de pesquisas com chaminé solares para dessalinização e obtenção de energia .

- ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – Relatório Ranking das Tarifas - Disponível em: <
<https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiMWQzYjk0ZDYtMzBhNi00MmI1LTlmMWItNmIwOWZhNDdlMjgwIiwidCI6IjQwZDZmOWI4LWVjYTctNDZhMi05MmQ0LWVhNGU5YzAxNzBIMSIsImMiOjR9&>> - Acessado em: 14 de Ago. de 2021- 2021.
- ANDERS, C. R.; SANTOS, S. J. S. A.; DIAS, N. S.; MELO, M. R. S. - Qualidade e impactos causados pela destinação de rejeito da dessalinização da água salobra no Oeste de Potiguar. In: I Workshop Internacional sobre água no semiárido brasileiro; 2013; Campina Grande: Paraíba, 2013.
- AQLAN, A. M.; AKLAN, M.; ABDULMALIK E. M. – Sola-powered desalination, a novel solar still directly connected to solar parabolic trough – 2021 – Energy Reports 7 – 2245-2254.
- ASAYESH, M.; KASAEIAN, A; ATAELI, A. – 2017 - Optimization of a combined solar chimney for desalination and power generation. Energy Convers Manag 2017; 150:72e80. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.08.006>> Acessado em: 21 mai. De 2021 – 2017.
- ATTIG-BAHAR, F.; GUELLOUZ, M. S.; SAHRAOUI, M.; KADDECHE, S. - Economic analysis of a 1 MW solar chimney power plant in Tozeur, Tunisia - <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.06.073> - 1481/%C2%A9%202021%20Elsevier%20Ltd.%20All%20rights%20reserved. – 2021.
- AZAD, A.; AGHAEI, E. JALALI, A.; AHMADI, P. - Multi-objective optimization of a solar chimney for power generation and water desalination using neural network - School of Mechanical Engineering, College of Engineering, University of Tehran, P. O. Box 11155-4563, Tehran, Iran - <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114152> - 2021.
- AZAM, Shahid; LI, Qiren. Tailings dam failures: a review of the last one hundred years. Geotechnical news, v. 28, n. 4, p. 50-54, 2010.
- BANDI, C. S.; UPPALURI, R. e KUMAR, A. - Global Optimization of MSF seawater desalination processes. Desalination, vol. 394, p30-43. Set., 2016.
- BERNARDES M.A.S.; VOß A.; WEINREBE G. Thermal and Technical Analyses of Solar Chimneys. Solar Energy, v.75, p. 511-524, 2003.
- BERTOLIN, M. Resíduos de desastres ambientais: um olhar diferenciado sobre o rompimento da Barragem do Fundão (Mineradora Samarco), em Mariana-MG – 2018 - Trabalho de Conclusão de Curso – Escola de Engenharia de São Carlos, Programa de Graduação em Engenharia Ambiental, São Carlos, São Paulo - 2018.

- BISWAS, A. R. – Distillation of water by solar energy – 2012 – VSRD International Journal of Mechanical Automobile and Production Engineering 2 (5), 166-173.
- CAMPOS, B. L. O.; COSTA, A. O. S.; FRAGA, M. M. C.; COSTA JR., E. F. – 2019 - Análise do processo de dessalinização solar com ênfase no método de umidificação e desumidificação - Engenharia Sanitaria e Ambiental, September-October 2019, Vol.24(5), pp.861-873 – 2019.
- CAMPOS, B. L. O., COSTA, A. O. S., COSTA JR., E. F. - Mathematical modeling and sensibility analysis of a solar humidification-dehumidification desalination system considering saturated air.- 2017 - Solar Energy 157, 321-327. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2017.08.029> Acesso em: 16 ago. 2020.
- CAMPOS, B. L. O. Modelagem de um processo térmico de dessalinização solar por umidificação e desumidificação – DISSERTAÇÃO (Mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais – Escola de Engenharia – Departamento de Engenharia Química – Belo Horizonte, 2017.
- CARMO, F. F.; KAMINO, L. H. Y.; TOBIAS JUNIOR, R.; CAMPOS, I. C.; CARMO, F. F.; SILVINO, G.; CASTRO, K. J. S. X.; MAURO, M. L.; RODRIGUES, N. U. A.; MIRANDA, M. P. S.; PINTO, C. E. F. - 2016 - Fundão tailings dam failures: the environment tragedy of the largest technological disaster of Brazilian mining in global context - *Perspect. Ecol. Conserv.*, 15 (2017), pp. 145-151, 10.1016/j.pecon.2017.06.002
- CASTRO SILVA, J. Análise Experimental e Numérica de uma Chaminé Solar Modular. 2018. 128 f. TESE (Doutorado) – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Belo Horizonte, 2018.
- CASTRO SILVA, J. Modelagem do Escoamento de ar e otimização de uma Chaminé Solar. 2014. 158 f. DISSERTAÇÃO (Mestrado) – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Belo Horizonte, 2014.
- CASTRO SILVA, J. O.; FERNANDES, T. S.; MARINHO JUNIOR, P.F. ; LEDO, L.F.R. ;HANRIOT, S. M.; MAIA, C. B.. Influência do regime de escoamento em uma chaminé solar de pequeno porte. In: CMN 2015 - Congresso de Métodos Numéricos em Engenharia, 2015, Lisboa. Anais do CMN 2015, 2015.
- CEMIG - (Companhia Energética de Minas Gerais S.A) – Valores de Tarifas e Serviços – Disponível em: <https://www.cemig.com.br/atendimento/valores-de-tarifas-e-servicos/> - Acessado em: 13 de Agosto de 2021.
- CENGEL, Y.A.; GHAJAR, A.J. - Heat and Mass Transfer: Fundamentals & Applications, 4. ed. New York: McGraw-Hill, 2011.

- CENGEL, Y.A. – Heat Transfer: a practical approach. – 2014 – New York: Mcgraw-hill companies, 2014.
- CHENG, X.; SHI, L.; DAI, P.; ZHANG, G.; YANG, H.; LI J. - Study on optimizing design of solar chimney for natural ventilation and smoke exhaustion Energy Build., 170 (2018), pp. 145-156, 10.1016/j.enbuild.2018.04.016
- CHU, C.M.; BIN MISRAN, M. S.; THAM, H. J.; RAHMAN, M. M. -Numerical Analysis of Solar Chimney Design for Power Generation - Cold Inflow-Free Solar Chimney, pp 103-115 - 2021.
- CIPOLLINA, A., MICALE, G., RIZZUTI, L. Seawater desalination - Conventional and renewable energy processes, Springer Science & Business Media, (2009).
- CRAWLEY, D. B.; HUANG, Y. J. – Does it matter which weather data you use in energy simulations? – Building Energy Simulation User News, v.18 – n.1 – 1997.
- CONECTAS – DIREITOS HUMANOS. Dados: Os números da tragédia de Brumadinho – Disponível em: < <https://www.conectas.org/noticias/fact-sheets-o-numeros-da-tragedia-de-brumadinho>> Acesso em: 24 jul. 2020.
- CONSTITUIÇÃO (1988) - Constituição da República Federativa do Brasil. Brasília, DF: Senado Federal: Centro Gráfico, 1988.
- COOLEY, H.; GLEICK, P. H.; WOLFF, G. – Desalination, with a grain of salt – A California perspective – 2006 - Pacific Institute for Studies in Development, Environment, and Security 654 13th Street, Preservation Park Oakland, California 94612 - ISBN: 1-893790-13-4 - ISBN-13: 978-1-893790-13-1 – Junho – 2006.
- COOLEY, H.; GLEICK, P. H.; WOLFF, G. DESALINATION , WITH A GRAIN OF SALT A California Perspective – 2006 – Disponível em: http://www.pacinst.org/reports/desalination/desalination_report.pdf - Acessado em: 26 abr. de 2021.
- COOPER. P. I. - Digital Simulation of Transient Solar Still Processes - Solar Energy , vol. 12, pp. 313-325, 1969.
- CPRM, 2019 - Monitoramento especial da bacia do rio Paraopeba – Relatório 01: Monitoramento Hidrogeológico e Sedimentométrico – Disponível em: < http://www.cprm.gov.br/sace/conteudo/paraopeba/RT_01_2019_PARAOPEBA.pdf> Acessado em: 26 abr. de 2021.
- DATSGERDI, H. R.; WHITTAKER, P. B e CHUA, H. T. - New MED based desalination process for low grade waste heat. Desalination, vol. 395, p.57-71. Out., 2016.

- DHAHRI, A.; OMRI, A. – A review of solar chimney power generation technology – 2013 – International Journal of Engineering and Advanced Technology - vol. 2 – no. 3 – pp. 1-17 – 2013.
- DIAS, D. M.; MATINEZ C. B.; LIBÂNIO M. Avaliação do impacto da variação da renda no consumo domiciliar de água. Revista Engenharia Sanitária, Belo Horizonte, v.15. n.2, p.155-166. Abr./Jun. 2010.
- DRAPER, A. J., JENKINS, M. W., KIRBY, K. W., LUND, J. R., Economic-engineering optimization for California water management, Journal of water resources planning and management, 129 (2003) 155-164.
- DSILVA D. W. R.; INIYAN, S.; SUGANTHI, L.; DAVIES, P.A. - Solar stills: a comprehensive review of designs, performance and material advances Renew. Sustain. Energy Rev., 63 (2016), pp. 464-496, 10.1016/j.rser.2016.05.068
- DUARTE, A. P. - Classificação das barragens de contenção de rejeitos de mineração e de resíduos industriais no estado de Minas Gerais em relação ao potencial de risco. Universidade Federal de Minas Gerais. Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Belo Horizonte, 2008.
- EL-HAROON, A.A., 2002. The effect of wind speed at the top of the tower on the performance and energy generated from thermosyphon solar turbine. Int. J. Sol. Energy 22, 9–18. <https://doi.org/10.1080/01425910212851> - 2002.
- ELIASSON, J. - The rising pressure of global warming shortages. – 2015 - Nature 517, 6. Nature Publishing Group. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1038/517006a> acesso em: 17 ago. 2020
- ELTAWIL, M.A., ZHENGMING, Z., YUAN, L., A review of renewable energy Technologies integrated with desalination systems. Renew. Sustain. Energy Review. 13, 2245-2262. 2009.
- ESPÓSITO, T. J. - Metodologia probabilística e observacional aplicada a barragens de rejeito construídas por aterro hidráulico. Brasília: UnB, 2000.
- EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - Matriz Energética e Elétrica - 2021 - Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica> >. Acesso em: 03 mai. 2021.
- FATHI, N., ALEYASIN, S.S., VOROBIEFF, P., 2016. Numerical-analytical assessment on Manzanares prototype. Appl. Therm. Eng. 102, 243–250. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.03.133> – 2016.

- FERNANDES, G. – 2005 – Comportamento de estruturas de pavimentos ferroviários com utilização de solos finos e/ou resíduos de mineração de ferro associados a geossintéticos. Tese de Doutorado – Universidade de Brasília – UnB – Brasília – 250 pg – 2005.
- FERNANDES, G. W.; GOULART, F. F.; RANIERI, B. D.; COELHO, M. S.; DALES, K.; BOESCHE, N.; BUSTAMANTE, F. A.; CARVALHO, D. C.; CARVALHO, R.; DIRZO, S.; FERNANDES, P. M.; GALLETI JR., V. E. G.; MILLAN, C.; MIELKE, J. L.; RAMIREZ, A.; NEVES, C.; ROGASS, S. P.; RIBEIRO, A.; SCARIOT, B.; SOARES FILHO, B. - Deep into the mud: ecological and socio-economic impacts of the dam breach in Mariana, Brazil - *Nat. Conserv.*, 14 (2016), pp. 35-45, 10.1016/j.ncon.2016.10.003 – 2016.
- FINANCIAL TIMES - EU carbon credit prices roar back as traders bet on intervention – Disponível em: <https://www.ft.com/content/be382b73-cb83-4997-b0a6-dc543f30877c> - Acessado em: 13 de Ago. de 2021.
- FLETCHER, D.E., HOPKINS, W.A., SALDAÑA, T., BAIONNO, J.A., ARRIBAS, C., STANDORA, M.M., FERNANDEZ-DELGADO, C. - 2006 - Geckos as indicators of mining pollution. *Environ. Toxicol. Chem.* 25, 2432e2445.
- FLURI, T.P.; PRETORIOUS, J.P.; VAN DYK, C.; VON BACKSTROM, T.W.; KROGER, D.G.; ZIJL, G.P.A.G.V. - Cost analysis of solar chimney power plants. *Sol. Energy* 2009, 83, 246–256.
- FOX, R. W.; PRITCHARD, P. J.; MCDONALD A. T – Introdução à Mecânica dos Fluidos – 7 Ed. -Rio de Janeiro – LTC – 2010.
- FUNDAÇÃO DE AMPARO À PESQUISA DO ESTADO DE SÃO PAULO - FAPESP. Para tirar o sal da água. *Engenharia Hídrica. Revista Virtual.* P 64-68 - Maio 2019.
- FREIRE, E. M.; MARCO, F. S. DI e MARTINS, V. de A. P. Análise comparativa da viabilidade ambiental, financeira, comercial e tecnológica entre métodos de dessalinização. 2015. Monografia (Graduação). Universidade de São Paulo. São Paulo, 2015.
- FREITAS, T. D. N. - Produção de água a bordo e navios e plataformas [TCC]. Rio de Janeiro (RJ): Universitário da Zona Oeste; 2011.
- GELENCSÉR, A., KOVÁTS, N., TURÓCZI, B., ROSTÁSI, A., HOFFER, A., IMRE, K., NYIRÕ-KÓSA, I., CSÁKBERÉNYI-MALASICS, D., TÓTH, A., CZITROVSZKY, A., NAGY, A., NAGY, S., ÁCS, A., KOVÁCS, A., FERINCZ, A., HARTYÁNI, Z., PÓSFAL, M. – 2011 - The red mud accident in Ajka (Hungary): characterization and potential health effects of fugitive dust. *Environ. Sci. Technol.* 45, 1608–1615

- GOVERNO FEDERAL BRASILEIRO - Brasil em números – Brazil in figures / IBGE. Centro de Documentação e Disseminação de Informações – Rio de Janeiro, RJ - Vol. 22 – p. 1 – 428, 2014.
- GOVERNO FEDERAL BRASILEIRO - Dia Mundial da Água - 10 Empresas firmam parceria com o programa Águas Brasileiras - Publicado em 22/03/2021 às 16h34 Atualizado em 25/03/2021 às 16h24 - Disponível em: < <https://www.gov.br/pt-br/noticias/meio-ambiente-e-clima/2021/03/dez-empresas-firmam-parceria-com-o-programa-aguas-brasileiras>>. Acesso em: 03 abr. 2021.
- GOVERNO FEDERAL BRASILEIRO - Programa de dessalinização do Governo Federal é reconhecido por associação internacional – Publicado em: 17/09/2020 às 16h20 – Disponível em: < <https://www.gov.br/casacivil/pt-br/assuntos/noticias/2020/setembro/programa-de-dessalinizacao-do-governo-federal-e-reconhecido-por-associacao-internacional>> Acesso em: 07 abr. 2021.
- GREENLEE, L. F. Reverse osmosis desalination: Water sources, technology, and today's challenges. *Water Research*, 2009.
- GU, A.; ZHOU, X. - Emission reduction effects of the green energy investment projects of China in belt and road initiative countries - *Ecosystem Health and Sustainability*, 6:1, 1747947, DOI: 10.1080/20964129.2020.1747947 – 2020.
- GUO, P.; ZHOU, Y.; ZHANG, D.; XU, B.; LI, J. - Numerical investigation and multi-objective thermo-economic optimization of a solar chimney power plant - 10 February 2021 – Disponível em: <https://doi-org.ez93.periodicos.capes.gov.br/10.1002/er.6521> - National Natural Science Foundation of China, Grant/Award Numbers: 51876158, 51776145 – 2021.
- HAAF, W., FRIEDRICH, K., MAYR, G., SCHLAICH, J., 1983. Part I: principle and construction of the pilot plant in manzanares. *Int. J. Sol. Energy* 2, 3–20. <https://doi.org/10.1080/01425918308909911> – 1983.
- HAMMADI, S. H. - Combined Solar Chimney Power Plant and Solar Still - *Basrah Journal for Engineering Sciences*, vol. 16, no. 2, 2016.
- HARDY, R. - ITS-90 Formulations for Vapor Pressure, Frostpoint Temperature, Dewpoint Temperature and Enhancement Factors in The Range -100 - in *The Third International Symposium on Humidity and Moisture*, London , 1998 .
- HENTHORNE, L., *Desalination - a critical element of water solutions for the 21st century*, International Desalination Association, (2009).

- HERRMAN, Ulf. Renewable Energy Technologies. Course Master Engineer Systems – Winter Semester 15/16. 673 f. Notas de Aula. PDF – 2016.
- HO C.J.; CHOU, W.L.; LAI C.M. – 2016 - Thermal and electrical performances of a watersurface floating PV integrated with double water-saturated MEPCM layers.- Appl Therm Eng - 94:122e32. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.10.097> – Acessado em: 25 mai. De 2021 - 2016.
- HOMEYER, O. H., BOHM, S. - 2015. Trends toward 100% renewable electricity supply in Germany and Europe: a paradigma shift in energy policies. Wiley Interdiscip. Rev. Energy Environ. 4, 74 – 97.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – 2021 - IBGE antecipa divulgação de informações georreferenciadas da região de Brumadinho - Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/novo-portal-destaques/23639-informacoes-brumadinho.html> - Acesso em: 27 jul. 2021.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO, IBRAM – 2019 - Gestão de Barragens e Estruturas de Disposição de Rejeitos. Disponível em: <http://portaldamineracao.com.br/ibram/>. Acesso em: 03 abr. 2021.
- INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DE ÁGUAS. IGAM – Bacia Hidrográfica do Paraopeba. Disponível em: <http://comites.igam.mg.gov.br/conheca-a-bacia-sf3> > Acessado em 20 ago. 2020
- INTERNATIONAL DESALINATION ASSOCIATION, IDA. 2020. Disponível em: <https://idadesal.org/> > Acesso em: 04 ago. 2020.
- JAMES, W. S.; PEARSONS, S. R. – The Effect of Atitude on Radiator Performance – NACA – Annual Report 5 – United States – 1920.
- JONNALAGADDA, S. B.; MHERE, G. Water quality of the Odzi River in the eastern highlands of Zimbabwe. Water Research, v. 35, n. 10, p. 2371 – 2376, 2001.
- JORNAL ELETRÔNICO AMBIENTE BRASIL – 2017 - Dessalinização da água do mar está na pauta da Comissão de Meio Ambiente - Disponível em: <https://noticias.ambientebrasil.com.br/clipping/2017/10/07/139180-dessalinizacao-da-agua-do-mar-esta-na-pauta-da-comissao-de-meio-ambiente.html> > - Acesso em: 07 abr. 2021.
- KASEAIAN A.B., MOLANA, S.H. , RHAMANI, K. , WEN, D. - A review on solar chimney systems - Renewable and Sustainable Energy Reviews, V.57, P. 954 – 987, 2016.
- KIWAN, S., AL-NIMR M., ABDEL Q. I. S. - Solar chimney power-water distillation plant (SCPWDP) - Desalination 445 (2018) 105–114 – 2018.

- KUDISH, A.I.; GALE, J.; ZARMI, Y. (1982) - A low cost design solar desalination unit. *Energy Conversion and Management*, v. 22, n. 3, p. 269-274. [https://doi.org/10.1016/0196-8904\(82\)90052-8](https://doi.org/10.1016/0196-8904(82)90052-8) – 1982.
- LAURINO, B. I.; PRETO, C. T. J. O.; FERREIRA JUNIOR, C. P. – Análise acidente em Brumadinho – Minas Gerais – Utilização de rejeitos de barragem na construção civil – 2020 - ISSN 2595-0584 - V.3 N.1 - Março 2020 - pag. 231 – 238 - Revista eletrônica
- LIBÂNIO, M. 2010. Fundamentos de qualidade e tratamento de água – Campinas, SP: Editora Átomo, 2010. 3ª Edição.
- LI, J. Y.; GUO, P. H.; WANG, Y. – Effects of collector radius and chimney height on power output of a solar chimney power plant with turbines – School of energy and Power Engineering, Xian University – 2012.
- LOZANO, Fernando Arturo Erazo. Seleção de locais para barragens de rejeitos usando o método de análise hierárquica. 2006. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.
- LUPI, F.; BORRI, C.; HARTE, R.; KRÄTZIG, W. B.; NIEMANN, H. J. Facing technological challenges of solar updraft power plants. *Journal of Sound and Vibration*, v. 334, p. 57-84, 2015.
- MACHADO, W. G. F. - Monitoramento de barragens de contenção de rejeitos da mineração. 2007. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.
- MAGRIS, R. A.; MARTA-ALMEIDA, M.; MONTEIRO, J. A.; BAN, N. C. – A modelling approach to asses the impact of land mining on marine biodiversity: Assessment in coastal catchments experiencing catastrophic events (SW Brazil) - 2019 – *Science of Environment*, n. 659, p. 828-840.
- MAIA, C. B. Análise Teórica e Experimental de uma Chaminé solar: Avaliação Termofluidodinâmica. 2005 - Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Mecânica, Brasil.
- MAIA,C.B.; CASTRO SILVA, J.O.; CABEZAS-GÓMEZ, L.; HANRIOT, S.M.; FERREIRA, A.G. Energy and exergy analysis of the airflow inside a solar chimney. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 27, p. 350–361, 2013.
- MAIA, C. B.; FERREIRA, A. G.; CABEZAS-GÓMEZ, L.; CASTRO SILVA, J. O.; HANRIOT, S.M. Thermodynamic analysis of the drying process of bananas in a small-scale solar updraft tower in Brazil. *Renewable Energy*, v. 114, p. 1005-1012, 2017.

- MAIA, C.B.; FERREIRA, A.G.; VALLE, R.M.; CORTEZ, M.F.B. Theoretical evaluation of the influence of geometric parameters and materials on the behavior of the airflow in a solar chimney, *Computers & Fluids*, v. 38, p. 625-636, 2009.
- MAIA C. B., SILVA, F.V.M., OLIVEIRA, V.L.C., KAZMERSKI, L.L. 2019. An overview of the use solar chimneys for desalination. *Solar Energy*. V. 183, p. 83 – 95, 2019.
- MALLEVIALLE, J. ODENDAAL, P. E.; WIESNER, M. R. *Water Treatment Membrane Processes*. American Water Works Association Research Foundation; Lyonnaise des Eaux; Water Research Commission of South Africa. McGraw-Hill. Washington, DC, USA, 1996.
- MANCUSO, P. C. S., DOS SANTOS, H. F. *Reúso da Água*. Coleção Ambiental. Editora Manole. Baurerri, SP. 2002.
- MARINHO JÚNIOR, P. F.; CASTRO SILVA, J. O.; MAIA, C. B. – 2020 – Avaliação Numérica da Viabilidade de utilização de uma Chaminé Solar para Dessalinização - VIII Congresso Brasileiro de Energia Solar – Fortaleza, 01 a 05 de junho de 2020.
- MARINHO JÚNIOR, P. F., MORAIS, B. L. F., BARBOSA, R. R. C., *Análise Experimental da Secagem de Bananas em um Secador Solar Híbrido*. 2018. 117 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Programa de Graduação em Engenharia Mecânica, Belo Horizonte, 2018.
- MATHIOULAKIS, E.; BELESSIOTIS, V.; DELYANNINS, E. - Desalination by using alternative energy: Review and state-of-the-art. *Desalination*, vol. 203, p346-365. Feb., 2007.
- MENDES, C. B. – Reaproveitamento do rejeito de minério de ferro, liberado no desastre envolvendo o rompimento da barragem do Fundão (MG), na produção de blocos cerâmicos. 2019. Departamento de Engenharia Civil - Universidade Federal de Viçosa – Minas Gerais – 2019.
- MENDEZ C., BICER. Y. - Integration of solar chimney with desalination for sustainable water production: A thermodynamic assessment - *Case Studies in Thermal Engineering* 21 100687 - 2020
- MENDONÇA, D. E. – Planta de osmose reversa acionada por módulos fotovoltaicos com mppt e válvula autorreguladora de pressão – DISSERTAÇÃO (Mestrado) - Universidade Federal do Ceará – Departamento de Engenharia Elétrica. - Área de concentração: Sistema de Energia Elétrica - 2016.

- MENTER, F., CFD Best Practice Guidelines for CFD Code Validation for Reactor-Safety Applications, European Commission, 5 th EURATOM Framework Programme, Draft Report, EVOL-ECORA-D1, 2002.
- MING, T. - Solar Chimney Power Plant Generating Technology – 2016 - Zhejiang University Press Co., Ltd. Published by Elsevier Inc. - ISBN: 978-0-12-805370-6 – 2016.
- MING, T.; GONG, T.; DE RITCHER, R. K.; CAI, C.; SHEIF, S. A. – Numerical analysis of seawater desalination based on a solar chimney power plant. – 2017 - Appl. Energy 208, 1258-1273. Disponível em: <<http://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.09.028> - Acessado em: 11 abr. 2021 - 2017.
- MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA BRASILEIRO. Resenha Energética Brasileira. Exercício de 2018. Edição de Maio de 2019. Oferta e demanda de energia, instalações energéticas no mundo. 32 páginas. Maio de 2019.
- MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Programa água doce. 2020. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/mma-em-numeros/programa-agua-doce> - Acesso em: 24 jul. 2020
- MOCOCK, J.F.; PESSÔA, C. N.; MONTEIRO, A. T. S.; TORRES, A. S. C. G.; RABBANI, E. R. K. - Estudo Comparativo entre os principais métodos de dessalinização de águas subterrâneas: Revisão de Literatura. XX Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas - Revista Águas Subterrâneas. 2019.
- MONTEIRO, M. L.; Dessalinização da água através de um processo híbrido permuta iônica-nanofiltração. 105p. DISSERTAÇÃO (Mestrado) – Universidade de Coimbra - Departamento de Engenharia Química Faculdade de Ciências e Tecnologia – Coimbra, Portugal, 2016.
- MORAN, M.J.; SHAPIRO, H.N. - Princípios de Termodinâmica para Engenharia. - Rio de Janeiro: LTC, 2002.
- NEW YORK TIMES, The - World Population Could Peak Decades Ahead of U.N. Forecast, Study Asserts – 2020 – Disponível em: <<https://www.nytimes.com/2020/07/14/world/americas/global-population-trends.html#:~:text=the%20main%20story-,World%20Population%20Could%20Peak%20Decades%20Ahead%20of%20U.N.,8.8%20billion%20by%20century's%20end.> > Acessado em: 03 mar. 2021.
- NIZETIC.S.; NINIC, N.; KLARIN, B. Analysis and feasibility of implementing solar chimney power plants in the Mediterranean region. Energy 2008, 33, 1680–1690 – 2008.
- NUNES, C. C.; BORGES, F. T.; PRETA, M. F. S. C.; BAHIA, L. M. A. - Dessalinização de águas: o cenário atual brasileiro e suas projeções – 2018 - Revista Vozes dos Vales –

- UFVJM – MG – Brasil – Nº 13 – Ano VII – 05/2018 Reg.: 120.2.095–2011 – UFVJM – QUALIS/CAPES – LATINDEX – ISSN: 2238-6424 –Disponível em: www.ufvjm.edu.br/vozes - Acessado em: 07 abr. 2021.
- OLIVEIRA, A. P.; Recursos hídricos e tratamento de águas na mineração. 2001 - CETEM/MCT, 2001. 36p. (Série Tecnologia Ambiental).
- PEINEMANN, K., NUNES, S. P. Membrane Technology, Volume 4: Membranes for Water Treatment, John Wiley & Sons, (2010).
- PRETORIUS, J. - Optimization and Control of a Large-scale Solar Chimney power plant – TESE (Doutorado). University of Stellenbosch, África do Sul, 2007.
- PRETORIUS, J. P.; Kroger, D. G. – Critical evaluation of solar chimney power plant performance – Solar Energy 80 – 535-544 – 2006.
- PINHEIRO, J. C. V.; CALLADO, S. M. G. - Avaliação de desempenho dos dessalinizadores no Ceará. Rev Econ do Nordeste. 2005. 44-59.
- PORTO, E. R.; AMORIM, M. C. C.; ARAÚJO, O. J. - Potencialidades da Erva-Sal (*Atriplex nummularia*) irrigada com o rejeito da dessalinização de água salobra no semi-árido brasileiro como alternativa de reutilização. In:XXVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental. 2001 jan 08; Porto Alegre, RS: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental; 2001.
- PROGRAMA ÁGUA DOCE, MMA – 2012 - Programa Água Doce. Disponível em: <http://aguadoce.mma.gov.br/mapas.php>>. Acesso em: 07 de MAI. 2021.
- REBOUÇAS, A. C., BRAGA, B., TUNDISI, J. G. 2006. Águas doces no Brasil: capital ecológico, uso e conservação / 3 ed. São Paulo: Escrituras Editora, 2006.
- REN21–RENEWABLE ENERGY POLICY NETWORK FOR THE 21ST CENTURY (2016). Renewables 2016: Global Status Report. Report. Paris, France.
- RAHBAR, K.; RIASI, A. - Riasi Performance enhancement and optimization of solar chimney power plant integrated with transparent photovoltaic cells and desalination method Sustain. Cities Soc., 101441 (2019), 10.1016/j.scs.2019.101441
- RAGAZZI, L. ROCHA, M. Brumadinho: A engenharia de um crime – Belo Horizonte - Editora Letramento, 2019. 256p. 2019.
- SAMPAIO, C. M. dos S. - Dessanilização da água através de painéis solares fotovoltaicos. 2016. Dissertação (Mestrado). Universidade de Aveiro. Aveiro, 2016.
- SARY, R.; SYUHADA, A. - A Study on the Effect of Chimney Roof Angle Towards Temperature Uniformity on Multilevel Dryer - Proceedings of the 2nd International

- Conference on Experimental and Computational Mechanics in Engineering pp 447-457 – 2021.
- SCHLAICH, J. – The Solar Chimney: electricity from the sun – Stuttgart – Alemanha – Edition Axel Menges – 1995.
- SCHLAICH, J.; BERGERMANN, R.; SCHIEL, W.; WEINREBE, G. – 2005 - Design of Commercial Solar Updraft Tower Systems – Utilization of Solar Induced Convective Flows for Power Generation. Stuttgart – 2005.
- SEMAD - SECRETARIA DE ESTADO DE MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL – 2019 – Disponível em: <
<http://www.meioambiente.mg.gov.br/component/content/article/13-informativo/3748-mapa-espalhamento-do-rejeito-27-de-janeiro->> Acessado em: 07 mai. 2021.
- SHEIKHNEJAD, Y.; GANDJALIKHAN, N.; ABDOLREZA S. - Enhancement of solar chimney performance by passive vortex generator - Renewable Energy - Volume 169 - May 2021 – P. 437-450 – 2021.
- SHIL, S., SINGH, U.K. – 2019 - Health risk assessment and spatial variations of dissolved heavy metals and metalloids in a tropical river basin system. Ecol. Indic. 106, 105455. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105455>. Acessado em: 22 abr. De 2021.
- SILVA, M.C.C.; SENS, M.L.; SOARES, C.; ANDRADE NETO, C.O. (2014) Water purification by direct solar distillation process in isolated households. Acta Scientiarum, v. 36, n. 1, p. 75-80. <http://doi.org/10.4025/actascitechnol.v36i1.18737> – 2014.
- SILVEIRA, A. P. P.; NUVOLARI, A.; DEGASPERI, F. T.; FIRSOFF, W. – Dessalinização de Águas – São Paulo – Oficina de Textos – 2015 - ISBN 978-5-7975-194-3
- SINGH, U.K., KUMAR, B. - 2017 - Pathways of heavy metals contamination and associated human health risk in Ajay River basin, India. Chemosphere 174, 183–199. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.01.103>> Acessado em: 25 abr. de 2021.
- SOUZA FILHO, J. S., LABORDE, H. M. Avaliação do Consumo Energético de um dessalinizador solar de pequeno porte. – Água subterrânea e dessalinização/ Theodoro Paulo Severino Peters. Et al. Organizadores Arminda Sconi Messias, Marcos Roberto Nunes da Costa. Recife: UNICAP, 2006.
- SOUZA, T. S.; BARONE, L. S. F.; LACERDA D.; VERGÍLIO, C. S.; OLIVEIRA, B. C. V.; ALMEIDA, M. G.; THOMPSON, F.; REZENDE, C. E. – 2021 - Cytogenotoxicity of the water and sediment of the Paraopeba River immediately after the iron ore mining dam disaster (Brumadinho, Minas Gerais, Brazil) - Science of the Total Environment 775 (2021) 145193 – 2021.

- TALAVERA, D. L.; NOFUENTS, G.; AGUILERA, J.; FUENTS, M. – Tables for the estimation of the internal rate of return of photovoltaic grid-connected systems – Renewable and sustainable energy reviews – vol. 11 – pp. 447-466 – 2007.
- TAYYEBI, S.; ALISHURI, M. - The control of MSF desalination plants based on inverse model control by neural network. Desalination, vol. 333, p. 92-100. Jan., 2014
- TERAMOTO, E.H.; HENDRYK G.; MELINA B. T. Z.; MENEGÁRIO, A. A.; CHANG, H. K.; - 2021 - Metal speciation of the Paraopeba river after the Brumadinho dam failure - Science of the Total Environment 757 (2021) 143917 – 2021.
- TEROL, S. – The present state of research at the solar chimney power plant in Manzanares (Spain) and future prospects for large scale plants – International Congress on Renewable Energy Sources – vol. 1 – p. 1644 – 1987.
- THIRUGNANASAMBANDAM, M.; INIYAN, S.; GOIC, R. A review of solar thermal Technologies. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 14, n. 1, p. 312 – 322, 2010.
- TINGZHEN M., TINGRUI G., RENAUD K. R., CUNJIN C., SHERIF S.A. - Numerical analysis of seawater desalination based on a solar chimney power plant - Applied Energy 208 1258–1273 – 2017
- TRIEB, F.; LANGNIB, O.; KLAIß, H. - 1997 - Solar Electricity Generation — A Comparative View of Technologies, Costs and Environmental Impact - Solar Energy – 59 - Nos. 1–3, pp. 89–99 – 1997.
- UNITED NATIONS, ONU – 2012 - Managing Water Under Uncertainty and Risk: The United Nations World Water Development Report 4, Volume 1. Paris.
- UNITED NATIONS, ONU NEWS – 2020 - Perspectiva Global, Reportagens Humanas - Mais de 4,2 bilhões de pessoas vivem sem acesso a saneamento básico - Disponível em: <<https://news.un.org/pt/story/2020/11/1733352>> Acesso em: 26 abr. 2021.
- UNITED NATIONS, ONU - UNITED NATIONS ECONOMIC COMMISSION FOR EUROPE - Pathways to Sustainable Energy Accelerating Energy Transition in the UNECE Region – 2020 – Disponível em: <https://unece.org/DAM/energy/se/pdfs/CSE/Publications/Final_Report_PathwaysToSE.pdf> - Acessado em: 03 abr. 2021.
- UNITED NATIONS, ONU – World Population Prospects- Department of Economic and Social Affairs Population Dynamics – 2021 - Disponível em: <<https://population.un.org/wpp/Download/Standard/Population/>> Acesso em: 03 mar. 2021.
- U.S. Agency for International Development. The USAID Desalination Manual. Washington, D.C.:CH2M HILL International for the U.S. Agency for International Development, 1980.

- U.S. ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION (2016). International Energy Outlook 2016. Report Number: DOE/EIA-0484(2017). Washington, DC.
- VALE, M.B.; AZEVEDO, P.V. - Avaliação da produtividade e qualidade do capim e do sorgo irrigados com água do lençol freático e do rejeito do dessalinizador. *Holos*. 2013; 181-195.
- VERSTEEG, H.K.; MALALASEKERA, W. An Introduction to Computational Fluid Dynamics – The Finite Volume Method, 2.ed. Essex: Pearson Education Limited, 503p, 2007
- VILLES, V. S.; VELHO, J. P.; CHRISTOFARI, L. F.; LAZZARI, R.- Água como bem econômico: dessalinização para o combate da escassez hídrica no agronegócio. *Multitemas*, v. 24, n. 57, p. 217-231, 2019.
- VON BACKSTROM, T. W.; GANNON, A. J. – Compressible Flow through solar power plant chimneys – 2000 – *Solar energy Engineering* – vol. 122 – pp. 138-145 – 2000.
- WANGNICK, K. 1998 - IDA Worldwide Desalting Plants Inventory, No. 15. Gnarrenburg, Germany: Produced by Wangnick Consulting for the International Desalination Association, 1998.
- WANGNICK, K. 2002 - IDA Worldwide Desalting Plants Inventory. Gnarrenburg, Germany: Produced by Wangnick Consulting for the International Desalination Association, 2002.
- WANGNICK/GWI. 2005 - Worldwide Desalting Plants Inventory. Oxford, England: Global Water Intelligence, 2005. Data provided to the Pacific Institute.
- WANG. Y. P; FANG. Z. L; ZHU. L; YANG. Y; WANG, J. H.; HAN L. J. - Study on The Integrated Utilization of Seawater by Solar Chimney - *Acta Energy* , vol. 27, pp. 382-387, 2006.
- WANG, Y.; JUNHONG, W.; ZHU, L.; ZHIYONG, Y.; ZHENLEI, F. - The study of sea desalination and hot wind electric power integrated system by solar chimney. - 2006 - *Acta Energiae Solaris Sin* 2006; 27:731e6.
- WU, Q., ZHPU, H., TAM, N.F., TIAN, Y., TAN, Y., ZHOU, S., LEUNG, J.Y. - 2016 - Contamination, toxicity and speciation of heavy metals in an industrialized urban river: implications for the dispersal of heavy metals. Mar. 2016.
- YOSIF, M. F. - The Performance of Combined Solar Chimney System for Power Generation and Seawater Desalination – 2014 – Dissertação (Mestrado) - Institute of Graduate Studies and Research - Gazimağusa, North Cyprus.
- ZHOU, X.; YANG, J.; XIAO, B.; HOU, G.; XING, F. – Analysis of chimney height for solar chimney power plant – *Thermal Energy*, 2008.

- ZHOU, X.; YANG, J. K.; OCHIENG, R. M.; XIAO, B. - Numerical Investigation Solar Chimney of A Plume from A Power Generation Solar Chimney in An Atmospheric Cross Flow - *Atmospheric Research*, vol. 91, pp. 26-35, 2009.
- ZHOU, X.; XIAO, B.; LIU, W.; GUO, X.; YANG, J.; FAN, J. – Comparison of classical solar chimney power system and combined solar chimney system for power generation and seawater desalination – *Desalination* 250 (2010) – 249 to 256 – 2010.
- ZHOU, S. Z.; ZHANG, R. Y.; ZHANG, C. – *Meteorology and meteorology* – 3 Ed – Higher education Press – Beijing, China – 1997.
- ZHOU, X. XU, Y. YUAN, S. WU, C. ZHANG, H. Performance and potential of solar updraft tower used as an effective measure to alleviate Chinese urban haze problem. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* – 2015.
- ZHU, L.; JUNHONG, W.; YIPING, W.; ZHIYONG, Y.; ZHENLEI, F. – 2006 - Seawater desalination and waterpower integrated system with solar chimney. *Journal of Tianjin University* 2006; 39:575e80.
- ZOU. L, YUAN. Y., LI Z.,ZHENG. Y. - Experimental Research on Solar Chimneys Integrated with Seawater Desalination under Practical Weather Condition, *Desalination*, vol. 298, pp. 22-33, 2012.
- ZOU. L., ZHENG. Y., LI. Z., SHA. Y. -Solar Chimneys Integrated with Seawater Desalination - *Desalination*, vol. 276, pp. 207-213, 2011.
- ZUO, L.; DING, L.; CHEN, J.; Liu, ZIHAN; QU, N.; ZHOU, X.; YUAN, Y. -2018^a - The effect of different structural parameters on wind supercharged solar chimney power plant combined with seawater desalination - *Energy Conversion and Management*, 15 November 2018, Vol.176, pp.372-383 – 2018.
- ZUO, L., DING, L., CHEN, J., ZHOU, X., XU, B., LIU, Z., - 2018^b - Comprehensive study of wind supercharged solar chimney power plant combined with seawater desalination. *Sol. Energy* 166, 59–70. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.03.041> - 2018.
- ZUO, L.; LIU, Z.; DAI, P.; QU, N.; DING, L.; ZHENG, Y.; GE, Y. – Economic performance evaluation of the wind supercharging solar chimney power plant combining desalination and waste heat after parameter optimization. – 2021 - *Ge Energy* 227 (2021) 120496
- ZUO, L., LIU, Z., ZHOU, X., DING, L., CHEN, J., QU, N., YUAN, Y. - Preliminary study of wind supercharging solar chimney power plant combined with seawater desalination by indirect condensation freshwater production. – 2019 - *Desalination* 455, 79–88. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2019.01.008> – 2019.

- ZUO, L., YUAN, Y., LI, Z., ZHENG, Y., 2012. Experimental research on solar chimneys integrated with seawater desalination under practical weather condition. *Desalination* 298, 22–33. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2012.05.001>.
- ZUO, L., ZHENG, Y., LI, Z., SHA, Y., 2011. Solar chimneys integrated with sea water desalination. *Desalination* 276, 207–213. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2011.03.052>.
- ZUO, L.; ZIHAN, L.; LING, D.; NING, Q.; PENGZHAN, D.; BOFENG, X.; Yuan, Y. - Performance analysis of a wind supercharging solar chimney power plant combined with thermal plant for power and freshwater generation. – 2020 - *Energy Convers Manag* 2020;204:112282. Disponível em: < [https://doi.org/10.1016/ j.enconman.2019.112282](https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.112282).> Acessado em: 19 mai. De 2021. – 2020.