



**UNIVERSIDADE CATÓLICA DE PERNAMBUCO
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA, PÓS-GRADUAÇÃO E INOVAÇÃO
COORDENAÇÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO *STRICTO SENSU*
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM DESENVOLVIMENTO DE
PROCESSOS AMBIENTAIS**

LEONILDO PEREIRA PEDROSA JUNIOR

**VIABILIDADE TÉCNICA, ECONÔMICA E
AMBIENTAL DE UM SISTEMA ULTRASSÔNICO
PARA TRATAMENTO DE ÁGUA DE CALDEIRA**

Recife 06 de junho de 2023

LEONILDO PEREIRA PEDROSA JUNIOR

**VIABILIDADE TÉCNICA, ECONÔMICA E AMBIENTAL
DE UM SISTEMA ULTRASSÔNICO PARA
TRATAMENTO DE ÁGUA DE CALDEIRA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento em Processos Ambientais da Universidade Católica de Pernambuco, como pré-requisito para obtenção do título de Mestre em Desenvolvimento de Processos Ambientais.

Área de Concentração: Desenvolvimento de Processos Ambientais

Linha de Pesquisa: Modelagem, Inovação e Sustentabilidade.

Orientador: Prof. Dr. Valdemir Alexandre dos Santos

Recife 06 de junho de 2023

Ficha Catalográfica

P372v Pedrosa Junior, Leonildo Pereira
Viabilidade técnica, econômica e ambiental de um
sistema ultrassônico para tratamento de água de caldeira /
Leonildo Pereira Pedrosa Junior, 2023.
106 f.: il.

Orientador: Valdemir Alexandre dos Santos
Mestrado (Dissertação) - Universidade Católica de
Pernambuco. Programa de Pós-graduação em
Desenvolvimento de Processos Ambientais. Mestrado
em Desenvolvimento de Processos Ambientais, 2023.

1. Biotecnologia. 2. Água - Purificação. 3. Caldeiras.
4. Águas residuais - Purificação. 5. Testes de ultrassom.
6. Engenharia sustentável. I. Título.

CDU 574.6

Luciana Vidal - CRB4/1338

Viabilidade técnica, econômica e ambiental de um sistema ultrassônico para
tratamento de água de caldeira. © 2023 by Leonildo Pereira Pedrosa Junior is
licensed under CC BY-NC-ND 4.0

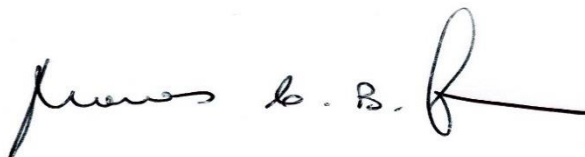
VIABILIDADE TÉCNICA, ECONÔMICA E AMBIENTAL DE UM SISTEMA ULTRASSÔNICO PARA TRATAMENTO DE ÁGUA DE CALDEIRA

LEONILDO PEREIRA PEDROSA JUNIOR

Examinadores:



Prof. Dr. Valdemir Alexandre dos Santos (Orientador)
Universidade Católica de Pernambuco – UNICAP



Prof. Dr. Marcos Antônio Barbosa de Lima (Titular Interno)
Universidade Católica de Pernambuco – UNICAP



Prof. Dr. Juliano Rodrigues Pappalardo (Titular Externo)
Instituto Avançado de Tecnologia e Inovação - IATI

Defendida em: 03 / 08 / 2023

Coordenador (a): Prof. Dr. Sérgio Mendonça de Almeida

DEDICATÓRIA

Aos meus avós Manoel
Sucupira (In memorian) e Iraci
Pereira de Melo (In memorian),
A minha mãe Maria de Fátima
Pedrosa. A minha esposa
Zenaide Verônica Pedrosa e
meus filhos Lucas Pedrosa e
Vitor Pedrosa.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, Jesus e a espiritualidade amiga que me acompanha nessa longa jornada.

Agradeço ao Prof. D. Sc. Valdemir Alexandre dos Santos pela oportunidade de retornar a vida acadêmica e ser inserido em sua equipe de pesquisadores. Pela paciência e amizade, pelos ensinamentos e apoio técnico diante dos conhecimentos adquiridos. Gratidão sempre!

Ao amigo e parceiro D. Sc. Leonardo Bandeira dos Santos por acreditar que poderia trilhar um novo caminho e fazer parte de uma equipe de pesquisadores dedicados e comprometidos com a inovação e seus resultados.

A todo corpo docente do Programa que me intuíram da melhor forma possível ao desejo de busca contínua do aprendizado e desenvolvimento da pesquisa.

Agradeço a TERMOCABO e ao Instituto Avançado de Tecnologia e Inovação (IATI) pela oportunidade de ter participado do projeto de P&D. A toda equipe de apoio pelo convívio com tantos profissionais e pesquisadores, do qual trouxe grande aprendizado e descobertas do âmbito da pesquisa.

Ao CNPq, CAPES pela bolsa, possibilitando a realização do Mestrado.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	vii
LISTA DE TABELAS	ix
LISTA DE QUADROS	x
RESUMO	xi
ABSTRACT	xii
CAPÍTULO I	15
1.INTRODUÇÃO	16
2.OBJETIVOS	18
2.1 <i>Geral</i>	18
2.2 Específicos.....	18
3.REVISÃO DA LITERATURA	19
3.1. <i>Caldeiras industriais</i>	19
3.2 <i>Tratamento de água de caldeira</i>	21
3.3 <i>Osmose Reversa</i>	25
3.4 <i>Radiação Ultrassônica</i>	28
3.5. <i>Ondas ultrassônicas aplicada no tratamento de água de caldeiras</i>	39
CAPÍTULO II (ARTIGO 1)	58
1.Introdução	59
2. Materiais e Métodos	60
2.1. <i>Configuração Experimental</i>	60
2.2. <i>Análise das Condições Psicométricas</i>	61
2.3. <i>Balanços de massa e de energia</i>	63
2.4. <i>Análise de Componentes Principais (ACP)</i>	64
2.5. <i>Escolha e Preparação de Dados</i>	66
3. Resultados e Discussão	66
3.1. <i>Perfil Térmico do Protótipo de Bancada</i>	66
3.2. <i>Resultados da Análise de Componentes Principais</i>	67
3.3. <i>Ensaio com Águas de Alimentação com Diferentes Salinidades</i>	72
4. Conclusões	75
Referências	76
CAPÍTULO III (ARTIGO 2)	82
1. Introdução	83
2 Material e Método	85
2.1. <i>Inovação Tecnológica</i>	85
2.2. <i>Indicadores Econômicos</i>	86
2.3. <i>Elaboração do Fluxo de Caixa Projetado</i>	89

3. Resultados e Discussão	94
3.1. Indicadores Econômicos	94
3.2. Indicadores Ambientais	96
4. Conclusão	97
CAPITULO IV	102
4 Considerações Finais	103
Apêndice	105

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO I

Figura 1 – Caldeira de vapor e seus principais componentes.....	20
Figura 2 – Elementos de composição interna da membrana filtrante da DOW.....	28
Figura 3 – Espectros de ondas sonoras	29
Figura 4 – Modelo simplificado da microestrutura de um meio.....	31
Figura 5 – Propagação de ondas longitudinais.....	32
Figura 6 – Propagação de ondas transversais.....	32
Figura 7 – Ondas superficiais de Rayleigh.....	33
Figura 8 – Ondas superficiais de Love.....	33
Figura 9 – Ondas de Lamb.....	34
Figura 10 – Esquema ilustrativo de como as ondas ultrassônicas podem sofrer interferências num meio.....	36
Figura 11 – Cavitação acústica.....	37
Figura 12 – Cavitação inercial e não inercial.....	38
Figura 13 – Ciclo de uma bolha em um processo de cavitação inercial.....	38

CAPÍTULO II

Figura 1 – Diagrama esquemático do protótipo em escala de bancada usado para realizar testes de tratamento de água de caldeira com ondas de ultrassom de alta frequência.....	64
Figura 2 – Protótipo em escala de bancada desenvolvido para tratamento ultrassônico de água de caldeira.....	65
Figura 3 – Esboço de um gráfico psicrométrico mostrando a umidade absoluta dos pontos correspondentes aos ilustrados na Figura 1.....	66
Figura 4 – Perfil termográfico do protótipo ultrassônico em escala de bancada para tratamento de água de alimentação de caldeira.....	71
Figura 5 – Gráfico de scree da porcentagem de variância explicada dos principais componentes para a eficiência do tratamento de ultrassom de água utilizando o protótipo em escala de bancada.....	73
Figura 6 – Gráfico biplot com projeções das cargas dos principais componentes PC1 e PC2.....	75

Figura 7 – Gráfico biplot com projeções das cargas dos principais componentes PC1 e PC3.....	76
Figura 8 – Redução percentual na condutividade da água tratada em função da salinidade da água de alimentação do protótipo ultrassônico em escala de bancada para tratamento de água de caldeira.....	77
Figura 9 – Redução percentual de sólidos dissolvidos totais (TDS) em água tratada em função da salinidade da água de alimentação do protótipo ultrassônico em escala de bancada para tratamento de água de caldeira.....	77
Figura 10 – Produtividade específica em função da taxa de fluxo mássico de líquido (L) e gás (G).....	78

CAPÍTULO III

Figura 1 – Diagrama esquemático dos constituintes básicos do protótipo piloto do sistema ultrassônico de tratamento de água de caldeira (STUAC): (a) Corte transversal dos estágios; (b) Vista frontal de um protótipo piloto de 500 L/h	89
Figura 2 – Saldo líquido do investimento de aquisição do STUAC com obtenção de uma TIR de 26,16% a.a.....	96

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO I

Tabela 1– Classificação de caldeiras de acordo com as pressões.....	19
Tabela 2 – Velocidade de propagação de ondas longitudinais em diferentes meios.....	35

CAPÍTULO II

Tabela 1 – Especificações técnicas da instrumentação utilizada na configuração experimental.....	68
Tabela 2 – Resumo dos resultados padronizados da Análise de Componentes Principais aplicados aos experimentos realizados no protótipo em escala de bancada para tratamento de ultrassom de água de caldeira.....	71
Tabela 3 – Autovalores, porcentagem da variância explicada, autovalores cumulativos e porcentagem cumulativa da variância explicada (%) dos componentes principais.....	72
Tabela 4 – Coeficientes de carga característicos para os três primeiros componentes principais.....	73
Tabela 5 – Valores de parâmetros físico-químicos para água e água tratada antes e depois de uma única passagem pela câmara de irradiação do protótipo em escala de bancada.....	79

CAPÍTULO III

Tabela 1 – Valores a serem investidos na aquisição e instalação de um STUAC de 500 L/h.....	94
Tabela 2 – Parâmetro utilizados nos cálculos dos custos operacionais anual do STUAC.....	95
Tabela 3 - Parâmetros relativos aos descartes de resíduos sólidos para os sistemas STUAC e OR por um período de três anos.....	96

LISTA DE QUADROS

CAPÍTULO I

Quadro 1– Algumas aplicações de ultrassom em trabalhos com filtração com membrana.....	42
--	----

CAPÍTULO III

Quadro 1– Valores de tarifa industrial cobrado pela concessionária a partir de agosto de 2021.....	92
--	----

RESUMO

A caldeira é um equipamento com grande importância para os processos industriais, que além de estarem inclusos nos processos produtivos, são importantes na geração de energia. A capacidade de gerar vapor para tais processos requer água com alto grau de pureza, um bem que hoje se torna cada vez escasso. A água que alimenta a caldeira precisa passar por tratamentos e controles, a fim de evitar a sua ineficiência, custos excessivos e um risco à segurança da planta que a utiliza. O sistema de tratamento ultrassônico de água de alimentação de caldeiras (STUAC), abordado neste estudo, promove a separação dos sais existentes na água por efeito combinado umidificação-desumidificação de um fluxo de água atomizada misturada com ar quente. O estudo objetivou demonstrar a viabilidade técnica, econômica e ambiental (EVTEA) do STUAC, comparando-o com um sistema de Osmose Reversa na dessalinização de água de caldeira. O EVTEA foi implementado com auxílio de uma planilha eletrônica Excel de Microsoft®. Os resultados mostraram vantagens como baixo custo de operação e manutenção, eficiência semelhante (99%), baixíssimo teor de água residual (<1,0%) e a não utilização de produtos químicos em favor do STUAC.

Palavras-chave: Água de Caldeira. Técnicas ultrassônicas. EVTEA. Engenharia Verde. VPL. Payback. Osmose Reversa.

ABSTRACT

The boiler is a piece of equipment of great importance for industrial processes, which, in addition to being included in production processes, are important in energy generation. The ability to generate steam for such processes requires water with a high degree of purity, a commodity that is becoming less and less today. The water that feeds the boiler needs to undergo treatments and controls in order to avoid its inefficiency, excessive costs and a risk to the safety of the plant that uses it. The water that feeds the boiler needs to undergo treatments and controls in order to avoid its inefficiency, excessive costs and a risk to the safety of the plant that uses it. The ultrasonic boiler feed water treatment system (STUAC), addressed in this study, promotes the separation of salts in the water by the combined humidification-dehumidification effect of a stream of atomized water mixed with hot air. The study aimed to demonstrate the technical, economic and environmental viability of the STUAC, comparing it with a Reverse Osmosis system in boiler water desalination. The EVTEA was implemented with the aid of a Microsoft® Excel spreadsheet. The results showed advantages such as low operation and maintenance costs, similar efficiency (99%), very low residual water content (<1.0%) and the non-use of chemical products in favor of STUAC.

Keywords: Boiler Water. Ultrasonic Techniques. EVTEA. Green Engineering. VPL. Payback. Reverse Osmosis.

CAPÍTULO I

1. INTRODUÇÃO

As caldeiras são equipamentos utilizados em grande escala nos processos industriais e são destinados a produzir e acumular vapor em pressões acima da atmosférica, utilizando uma fonte de energia. O vapor gerado por elas é amplamente utilizado auxiliando vários processos industriais dentre eles o de secagem, desidratação, cozimento, produção de reações químicas e esterilização, desenvolvidos em indústrias de alimentos e bebidas, papel e celulose, têxtil, química, farmacêutica e agroindústrias, geração de energia, produção de petróleo e gás e fabricação de fertilizantes (HASNAIN et al., 2020). Por se tratar de um equipamento que utiliza várias faixas de pressão, as caldeiras necessitam de cuidados específicos por representarem alto risco para as plantas. E um desses cuidados é o tratamento de água utilizado por elas na geração de vapor, considerando que a presença de diversos contaminantes indesejáveis ao processo, que podem acarretar um vapor de má qualidade, paradas para manutenções mais frequentes, desgaste precoce de componentes e acidentes de grandes proporções (SANTOS, 2018).

O tratamento de água é primordial para manter a segurança e a eficiência na geração de vapor, com o intuito de remover sólidos em suspensão, gases dissolvidos e sais contidos na água, já que a mesma provoca corrosão, incrustações nas tubulações e arraste de partículas junto ao vapor. Devido à impossibilidade da obtenção de uma água isenta de contaminantes, é necessário que por intermédio de métodos de tratamento se alcance os valores mínimos de impurezas mediante os parâmetros de trabalho das caldeiras estabelecidos no projeto, tais como: pressão, temperatura, volume, demanda nominal de geração de vapor, entre outros, para possibilitar uma operação satisfatória, eficiente e, acima de tudo, que garanta a segurança do sistema e dos operadores envolvidos (SAJATH, 2020).

Os tratamentos de água de caldeira utilizados atualmente são provenientes de adição e controle de produtos químicos e o processo de osmose reversa, que como mencionado anteriormente, possui a finalidade de remoção dos contaminantes da água. E levando em consideração o conceito do tratamento de água por osmose reversa que consiste em retirar os sais ou realizar a dessalinização da água através do meio mais concentrado para o meio menos concentrado imposto por uma pressão osmótica, purificando assim a água, buscou-se iniciar um estudo utilizando um sistema ultrassônico para o tratamento da água de caldeira, já que existem diversas aplicações com o ultrassom para melhorar a eficiência e condições operacionais na dessalinização da água. A técnica de Ultrassom (US) vem sendo utilizada como um grande auxílio nos processos de dessalinização, sendo através da extração ou na diminuição de danos às estruturas de membranas (QASIM et al. 2020; BASHEER; MAHMOOD; ABDULBARI, 2019; CHO et al. 2019; OTU et al. 2018).

Um processo ultrassônico típico ocorre quando um transdutor opera com uma frequência entre 20 kHz e 600 kHz. Nesta faixa de frequência geram-se microbolhas com diâmetros médios de 150 μm , dando origem a uma energia de cavitação quando tais microbolhas entram em colapso (LEONG; JULIANO; KNOERZER, 2017). Na parte baixa desta faixa de frequência, (FETYAN; SALEM ATTIA, 2020) usou o ultrassom para reduzir os sólidos dissolvidos totais e verificou eficiências de tratamento para uma frequência de 28 kHz, 60 Watts de potência, tendo alcançado uma redução de turbidez de 76%. Com 27,2 kHz, durante 30 segundos, a turbidez da água diminuiu 4 vezes (STEFAN; BALAN, 2011). Chua et al. (2009) trabalharam com ultrassom de densidade de potência da ordem de 0,024 W/cm³ por 120 minutos e a redução de sólidos totais solúveis (STS) na água foi de 84%. Os mesmos autores também obtiveram uma redução de 60% com uma densidade de potência de 0,06 W/cm³ por 60 min.

Nos processos ultrassônicos de alta frequência, entre 600 kHz e 5 MHz são geradas microbolhas menores, que quando entram em colapso produzem uma quantidade proporcionalmente menor de energia de cavitação (LEONG; JULIANO; KNOERZER, 2017). Ainda segundo os referidos autores, na vaporização da água obtida com auxílio da energia de vibração de um transdutor ultrassônicos de alta frequência, as moléculas do líquido também vibram a uma frequência muito elevada (cerca de 2 MHz). Durante a amplitude negativa do ciclo do transdutor são criados vazios súbitos que causam a produção de microbolhas, as quais são empurradas para a superfície da água durante a amplitude positiva do ciclo. Este efeito é adequadamente denominado de cavitação megassônica (CHUN-LIN; TE-YUN; YIIN-KUEN, 2020).

A análise de viabilidade econômica tem por objetivo verificar se os benefícios gerados com o investimento compensam os gastos realizados. Dessa forma, os custos envolvidos para implantação, funcionamento e manutenção desses sistemas devem ser detalhados e avaliados de forma minuciosa a fim de justificar se a execução do investimento foi economicamente viável ou não, e em quanto tempo espera-se um retorno financeiro (GABOARDI, FERREIRA, SILVA, 2020). Esta pesquisa teve como finalidade aplicar a técnica de EVTEA para estudar os resultados do desenvolvimento de um sistema ultrassônico de água de alimentação de caldeira, buscando mais uma alternativa de tecnologia em comparação ao sistema de tratamento de água por osmose reversa.

2. OBJETIVOS

2.1 Geral

Analisar técnica, econômica e ambientalmente um sistema ultrassônico desenvolvido para tratamento de água de alimentação de caldeira.

2.2 Específicos

- Definir as variáveis técnicas do sistema ultrassônico de tratamento de água de caldeira;
- Definir os elementos de receitas e despesas para o EVTEA;
- Projetar um fluxo de caixa com base na comparação do STUAC com um sistema de Osmose Reversa de mesma dimensão;
- Elaborar uma planilha eletrônica para quantificação dos indicadores econômicos;
- Listar os benefícios socioambientais alcançados por um investimento de implantação do sistema ultrassônico proposto.

3. REVISÃO DA LITERATURA

3.1. Caldeiras Industriais

As caldeiras são equipamentos usados para gerar vapor de água em pressões acima da atmosfera, via fonte de energia. Podendo ser vapor saturado ou úmido, para processamentos industriais, e vapor seco ou superaquecido, para alimentar motores a vapor, turbinas e geradores de energia elétrica, através da energia mecânica. (HASNAIN et al., 2020)

Por se tratar de um equipamento imprescindível no atendimento a processos industriais que necessitam de um grande volume de vapor e temperaturas elevadas, possuem características que permitem um fornecimento de fluxo contínuo e seguro. Elas são extremamente versáteis e podem ser projetadas para funcionar com diferentes combustíveis e níveis de pressão e temperatura (STENBERG; RYDÉN; LIND, 2023). De modo que são classificadas em 3 categorias conforme a norma regulamentadora NR-13, a partir da faixa de pressão ao qual atuam, sendo indicadas abaixo:

- **Categoria A** – operam com pressão igual ou superior a 1960 kPa (19,98 kgf/cm²);
- **Categoria C** – pressão de operação igual ou inferior 588 kPa (5,99kgf/cm²) e a capacidade é igual ou inferior a 100 litros;
- **Categoria B** – todas as caldeiras que não se enquadram nas categorias anteriores

Existe outra classificação das caldeiras quanto a faixa de pressão que os processos operacionais atuam, essa classificação é determinada pela Associação Nacional de Águas, como mostrado na Tabela 1.

Tabela 1. Classificação de caldeiras de acordo com as pressões.

Caldeira	Pressão	
	Psig	kgf/cm ²
Baixa pressão	100 – 400	7 – 28
Média pressão	400 – 800	28 – 56
Alta pressão	800 - 3000	56 – 211
Pressão supercrítica	Acima de 3000	Acima de 211

Adaptada de: SANTOS (2018)

No entanto, para efeitos na NR-13, a classificação que prevalece é a das categorias A, B e C. Porém, esta última pode auxiliar na determinação do tratamento de água e outras operações, pois está subdividida em mais faixas de pressão.

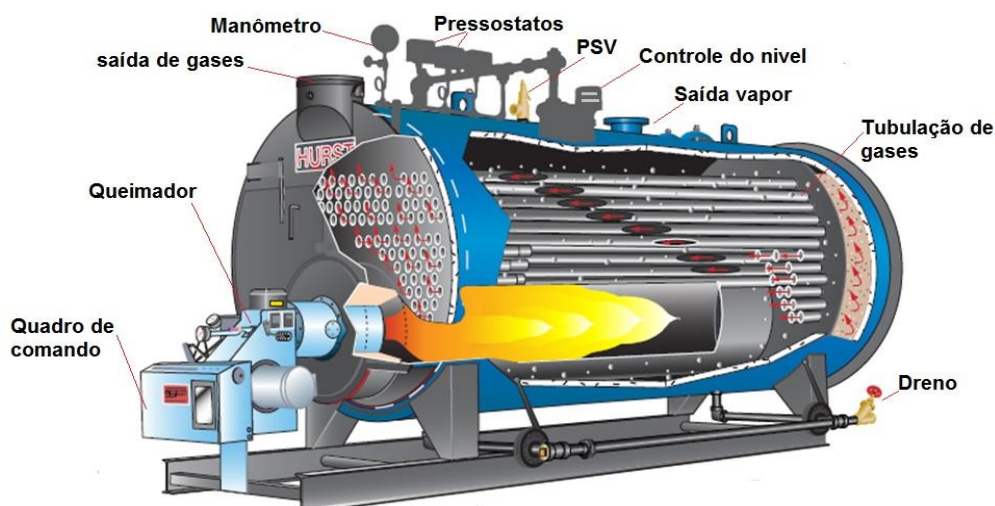


Figura 1 – Caldeira de vapor e seus principais componentes

Adaptada de: Santos, (2018)

Alguns tipos de caldeiras ou geradores de vapor de passagem (OTSGs) são projetados para gerar volumes significativos de vapor, normalmente consumindo cerca de 150 m³/h de água de alimentação da caldeira (BFW), enquanto converte aproximadamente 80% em massa dessa água em vapor. À medida que a água de alimentação se move pelas unidades OTSG, ele sofre mudanças geoquímicas e volumétricas significativas. Em resposta a aumentos de temperatura e ebulição, bem como interação geoquímica com a camada de passivação da tubulação OTSG tipicamente composta por magnetita, Fe₃O₄, quantidades variáveis de minerais podem precipitar do BFW, dependendo de sua qualidade. (KLYUKIN; MAYER; TUTOLO, 2023)

Esta precipitação mineral, que é muitas vezes referida como incrustação na literatura industrial, diminui a eficiência das caldeiras e pode, em última análise, causar vazamentos de falhas nos tubos. Embora a precipitação mineral não possa ser completamente evitada sem incorrer em custos muito altos de tratamento de água, os operadores de caldeira tentam mitigar os custos potencialmente significativos de vazamentos de falha das caldeiras usando várias abordagens químicas de tratamento de água para atender as especificações técnicas exigidas pelos fabricantes, bem como programando a limpeza mecânica dos tubos, comumente chamada de “pigging”. (KLYUKIN; MAYER; TUTOLO, 2023)

3.2. Tratamento de Água de Caldeira

Para empresas industriais que utilizam uma caldeira em suas instalações, algum tipo de sistema de tratamento de água de alimentação da caldeira é geralmente necessário para garantir um processo eficiente e geração de vapor de qualidade. O mais apropriado sistema de tratamento de água de alimentação da caldeira ajudará a instalação a evitar custos com o tempo de inatividade da fábrica, fruto de altas taxas de manutenção e falha da caldeira como resultado de incrustações, corrosão e incrustações da caldeira e de equipamento a jusante (EMARA; ABDELAZIZB; ELBARBARYC, 2016).

Um sistema de tratamento de água de alimentação de caldeira é composto por várias tecnologias individuais que atendem as suas necessidades específicas de tratamento. É essencial tanto para caldeiras de alta como de baixa pressão para garantir que o tratamento correto seja implementado antes de problemas como corrosão e incrustações (DRAGANA et al., 2012).

Um sistema de tratamento de água de alimentação de caldeira eficiente, bem projetado deveria ser capaz de (FEDOSEEVA, 2006):

- Tratar eficientemente a água de alimentação da caldeira e remover as impurezas prejudiciais, antes de entrar na caldeira;
- Promover o controle de fenômenos químicos internos à caldeira;
- Maximizar o uso de condensado de vapor;
- Controlar a corrosão na linha de retorno;
- Evitar o tempo de inatividade da planta e a falha da caldeira;
- Prolongar a vida útil do equipamento.

Um sistema básico de tratamento de água para alimentação de caldeiras normalmente inclui alguns itens como:

Filtração/ultrafiltração (BIZZO, 2019) – Faz parte do chamado tratamento externo à caldeira. É geralmente executada através de algum tipo de filtração para remoção de quaisquer partículas em suspensão, como sedimentos, turbidez e certos tipos de matéria orgânica. Muitas vezes, é útil fazer isso desde o início processo, pois a remoção de sólidos em suspensão a montante pode ajudar proteger membranas e resinas de troca iônica de incrustações mais tarde o processo de pré-tratamento. Dependendo do tipo de filtração usada, as partículas em suspensão podem ser removidas até menos de um micrômetro.

Abrandamento – Um dos tratamentos externos para eliminar somente a dureza da água de alimentação da caldeira (ARACHCHIGE; SAKUNA SANDUPAMA, 2019). Vários tipos de tratamentos utilizando outras tecnologias são aplicados quando se deseja proporcionar água totalmente desmineralizada. Existem vários métodos de abrandamento da água de alimentação de caldeira, entre os quais destacam-se: Abrandamento por troca de íons; Abrandamento com cal a frio; Abrandamento com cal, soda e carbonato a quente; Abrandamento com cal a quente e zeólitas. No abrandamento por resina de troca de íons o objetivo é a eliminação da dureza da água de abastecimento da caldeira. O processo de abrandamento se dá quando a água dura passa por uma coluna de resina aniônica, composta por cloreto de sódio (NaCl). Por meio de reação química ocorre a substituição do cálcio (carbonato de cálcio CaCO_3 ou o sulfato de cálcio CaSO_4), e o fosfato de magnésio em um processo contínuo até esgotar os mesmos, sendo necessária a regeneração que consiste em parar o processo contínuo e substituir a água tratada por uma solução de cloreto de sódio para a recomposição do cátion utilizado no tratamento químico da água de alimentação da caldeira e a remoção do cálcio e do magnésio presentes na resina.

Osmose reversa/Nanofiltração - Osmose reversa e nanofiltração são processos frequentemente usados na linha no processo do sistema de tratamento de água de alimentação da caldeira, de modo que a maioria das impurezas nocivas que podem sujar e entupir as membranas sejam removidas. São processos semelhantes de separação, uma vez que ambos forçam água pressurizada através de membranas semipermeáveis, capturando contaminantes como bactérias, sais, orgânicos, sílica e dureza, produzindo uma água purificada (SIMONIĆ, 2021). Nem sempre, contudo, é necessário na caldeira o tratamento de água de alimentação. Dessa forma, essas unidades de filtração são usadas principalmente onde a concentração de sólidos dissolvidos precisa ser extremamente reduzida.

Tratamento Interno – O método aplicado para o tratamento de água de baixa dureza é por meio da adição de produtos químicos na água já no interior da caldeira. O produto mais utilizado neste tipo de tratamento é trifosfato de sódio, e o método mais econômico de se tratar água de caldeira consiste na aplicação de sais no tubo de injeção da caldeira ou por um dosador de modo contínuo. O lodo é o resíduo formado pelas reações químicas que se deposita nas paredes inferiores da caldeira é descartado por descargas alternadas. Por meio da precipitação dos sais de cálcio pela reação do fosfato não permitindo a aderência do mesmo nas paredes da tubulação da caldeira, tornam-se solúveis os sais que deixavam a água de alimentação da caldeira dura. Um controle do pH pode ser aplicado na água da

caldeira para manter o valor entre 8,3 e 10,0. Com isto, o objetivo é eliminar o oxigênio dissolvido por meio do controle de cloretos e do teor total de sólidos, evitando a corrosão dos feixes de tubos internos da caldeira.

Coagulação/precipitação química - Depois que todos os objetos grandes são removidos da água original da fonte, vários produtos químicos são adicionados em um tanque de reação para remover os sólidos suspensos e outros contaminantes diversos. Este processo começa com uma variedade de reatores de mistura, tipicamente um ou dois, que adicionam produtos químicos específicos para remover todas as partículas mais finas da água, transformando-as em partículas mais pesadas que sedimentam. Os floculantes mais utilizados são à base de alumínio, como o alúmen e cloreto de poli alumínio. Eventualmente, um leve ajuste de pH ajudará a uma maior coagulação das partículas. Dependendo das impurezas presentes na água, qualquer combinação desses tratamentos pode se adequar melhor às suas instalações e compor seu sistema de tratamento e, dependendo das necessidades de sua planta e processo, esses componentes-padrão são geralmente adequados. Com auxílio das análises químicas propostas, foram possíveis as seguintes considerações (GAUTAM; SAINI, 2020; DRAGANA et al., 2012):

- Na eliminação da dureza os sais de cálcio e de magnésio precipitam, assim como carbonatos e sulfatos, formando os depósitos duros e isolantes do calor que são as incrustações. Um dos métodos existentes para eliminar a dureza é o tratamento catiônico.
- Na precipitação com fosfatos, esses reagem com os sais de cálcio e de magnésio, formando um produto insolúvel que não adere às partes metálicas da caldeira. O precipitado forma um lodo que se acumula no fundo da caldeira, sendo eliminado regularmente por meio de purgas.
- As purgas como redutoras de concentração de sólidos devem ser localizadas abaixo do nível da água, retirando o que se acumula pela precipitação de sais como fosfatos.
- No tratamento com quelatos não há precipitação do cálcio, nem do magnésio, mas se formam produtos solúveis. Os quelantes mais utilizados são o Ethylenediamine Tetraacetic Acid (EDTA) ou ácido etileno diaminotetra-acético, sendo este último um composto orgânico que age como agente quelante, formando complexos muito estáveis com diversos íons metálicos.
- No controle do pH e da alcalinidade deve-se manter a água alcalina, a eliminação do oxigênio dissolvido e controle dos cloretos e do teor total de sólidos para evitar a corrosão dos feixes de tubos internos da caldeira. Os produtos empregados no

controle do pH e da alcalinidade são a soda a 50% e a soda (hidróxido de sódio) em lentilhas. Não é necessária a adição de ácidos para o controle do pH e da alcalinidade, pois as águas de alimentação são geralmente bastante ácidas.

- A eliminação do oxigênio dissolvido é de vital importância para evitar o processo de corrosão. Para garantir a eliminação do oxigênio dissolvido deve ser feita a reação entre certos agentes redutores e o O_2 . Os dois produtos mais usados são o sulfito de sódio e a hidrazina. Utilizando sulfito de sódio para remoção de oxigênio tem-se como produto final o sulfato de sódio, que eleva o nível de sólidos da água da caldeira. Quando é utilizado o sulfito de sódio em excesso, pode-se provocar uma reação na molécula deste, formando dióxido de carbono e gás sulfídrico que são altamente corrosivos para a linha de condensado. A reação química da hidrazina com o oxigênio, o produto originado é a água e o nitrogênio. Este método evita o aumento de sólidos dissolvidos na água. Podendo aumentar a reação da hidrazina, utilizando-se catalisadores orgânicos. Normalmente trabalha-se com hidrazina mantendo um resíduo de 0,1 a 0,5 ppm em N_2H_4 e as caldeiras de alta pressão entre 0,05 e 0,1 ppm em N_2H_4 . Além de retirar o oxigênio dissolvido da água de alimentação, esta forma uma película de magnetita protetora na superfície dos tubos. O principal problema do uso de hidrazina é a restrição ambiental decorrente de sua toxicidade.
- O controle da concentração de cloretos e sólidos totais promove a redução de problemas de corrosão. Quando o teor de sólidos aumenta, surgem problemas de arraste. A forma de controlar o aumento da concentração de cloretos e sólidos totais é por meio de purgas sempre que se fizer necessário.
- A dureza da água é outro parâmetro que pode causar incrustações nas partes internas da caldeira. O tratamento recomendado é dosar fosfato na água da caldeira que reage com os sais da água bruta, formando flocos visíveis que no início aumentam a turbidez da água e, após um tempo de reação se precipitam acumulando no fundo dos tanques e tubos da caldeira. A solução é um sistema de descarga de fundo que pode ser automatizado ou manual, porém se esse sistema não for eficiente, os sais ficam depositados no fundo dos tubos e no corpo da caldeira solidificando-se e formando incrustações. O tratamento interno da água da caldeira com fosfato só é recomendado quando a água já passou por um processo de pré-tratamento por abrandamento. É possível tratar a água da caldeira utilizando determinados polímeros que agem solubilizando os sais de dureza da água e removendo a turbidez e os resíduos sólidos que poderiam se depositar no fundo do

reservatório e nos tubos da caldeira, como não há sólidos decantados o número de descargas de fundo é menor.

3.3. Osmose Reversa

A instalação de um sistema de tratamento de águas antes de um sistema de alimentação de caldeira remove os sólidos dissolvidos e em suspensão, bem como o material orgânico que pode estar presente na água. A água utilizada para geração de vapor geralmente é obtida de rios e mananciais, gerando impactos ambientais. Na indústria do petróleo, a água responsável pela retirada de óleos em poços petrolíferos (água de produção) pode ser recuperada para alimentação das caldeiras. Essa água produzida apresenta em sua composição, inúmeros sais em dissolução como Cloretos, Sulfatos, Carbonatos e Bicarbonatos, bem como outros minerais não dissolvidos, mas em suspensão. Dessa forma, dependendo do tipo e quantidade dos sais e sólidos acima mencionados, contidos na água, esta água atacará quimicamente as paredes internas das tubulações de ferro e aço, provocando a corrosão. Tanto os sais em dissolução como os sólidos em suspensão tendem a se depositar nas paredes internas dos dutos, e esse problema aumenta com o aumento da temperatura da água, provocando as incrustações (FIDELIX, 2017; GOUVÊA et al., 2012; VOURCH et al., 2007; TORREIRA, 1995).

O objetivo dos processos de dessalinização até hoje desenvolvidos é o de remover os sais diluídos nas águas de um modo geral. A referida planta de dessalinização encontra-se entre as maiores do mundo e está localizada a 15 quilômetros ao sul de Tel Aviv, da empresa Soreq, com capacidade de produção de 624.000 m³/dia de água doce, o que representa 7,23 m³/s, sendo suficientes para abastecer uma cidade com população de mais de 2 milhões de habitantes (BJERKE, 2002). Surgiram então as membranas de acetato de celulose em 1953 criadas por Reid e Breton possuindo um bom desempenho como membranas permeáveis, mas por sua vez, apresentavam baixa taxa de rejeição de sais e baixo fluxo de permeado.

A osmose reversa e seus processos tiveram início na metade do século XX, quando o surgimento de pesquisas pela busca de soluções para o tratamento da água do mar a fim de torná-la potável. Após o fim da II Guerra Mundial, a população da Califórnia teve um crescimento rápido e a região semiárida estava enfrentando problemas com o abastecimento de água potável. Durante este período, a "conversão da água" de solução salina foi motivo de pesquisa de alta prioridade nos Estados Unidos e, especialmente, na Universidade da Califórnia. Em 1952, o Ministério do Interior criou o Escritório de Água Salina, que lançou uma abrangente pesquisa no desenvolvimento da dessalinização. Em 1954, um equipamento foi construído para a verificação experimental dos estudos,

equipamento este chamado de "Conversor para o princípio da osmose" (GOUVÊA et al., 2012; GLARER, 1998, BJERKE, 2002).

Existem inúmeras estratégias de pré-tratamento de efluentes industriais para seu uso futuro em sistemas de abastecimento de água de caldeira, incluindo, entre estas estratégias, o uso da Osmose Reversa (RODRIGUES, MENEZES; SANTOS, 2016). Fatores como características do efluente, economia, mão de obra, conhecimento de tecnologia, requisitos específicos da caldeira, requisitos de dimensionamento de área e assim por diante determinarão qual estratégia de pré-tratamento será utilizada. A osmose reversa atingiu sua maior aceitação na década passada como uma alternativa real e econômica para o pré-tratamento de águas com impurezas elevadas ou efluentes para uso em caldeiras. O pré-tratamento através da osmose reversa produz uma água de maior qualidade comparando-se com outras técnicas de tratamento, mas com algumas adequações operacionais, sendo elas positivas ou de aspectos negativos, a depender da situação. Segue uma descrição de algumas vantagens e desvantagens do uso da osmose reversa para tratamento de efluentes para uso em caldeiras a vapor:

- Remoção de 90 a 99, 9% dos sólidos dissolvidos totais para permitir que a caldeira opere em ciclos de concentração muito mais altos, chegando até 100 ciclos;
- Remove mais do que apenas dureza (cálcio e magnésio);
- Menor composição da caldeira e taxas de purga;
- Menor uso de combustível;
- Baixo consumo de produtos químicos em relação aos métodos convencionais (colunas de troca iônica) para tratamento interno da caldeira;
- Menor alcalinidade, resultando em menor demanda de amina neutralizante;
- Caldeiras mais limpas;
- A água não permeada pode ser de qualidade suficiente para a composição da torre de resfriamento ou a água da lavagem;
- Se estiver usando amaciadores, os custos de regeneração (incluindo sal e água) podem diminuir, dependendo do retorno atual do condensado e da taxa de purga;
- Sem produtos químicos regenerantes;
- Para as águas certas, menores requisitos de mão-de-obra podem ser alcançados.

Desvantagens:

- Custos elétricos elevados;
- Na fase de pré-tratamento pode ser necessário o manuseio de ácido;
- A vazão de água tratada é praticamente fixa, enquanto na troca de íons pode gerenciar fluxos variáveis;
- Pode ser necessário um removedor de cálcio à montante da Osmose Reversa;
- Com membranas de poliamida (PA), o cloro deve ser removido à montante do sistema Osmose Reverso;
- Maiores rigidez de monitoramentos, incluindo fluxo de permeado normalizado de Osmose Reversa, porcentagem de passagem de sal, quedas de pressão, SDI's, condutividade, temperaturas, etc.;
- Geralmente 25% da água em uma Osmose Reversa saem como rejeito;
- As membranas devem ser limpas e substituídas periodicamente;
- As incrustações microbiológicas podem ser um problema;
- O fluxo é sensível à temperatura;
- Em geral precisa-se de equipamento adicional de pré-tratamento;
- Em alguns efluentes, maiores exigências de mão-de-obra poderão ser necessárias.

O uso de membranas tem avançado tanto que a tendência é ser mais aplicada, pois, a crescente demanda e aplicação industrial têm demonstrado investimentos contínuos no desenvolvimento de novas membranas com maiores taxas de rejeição de sais, para a obtenção de água com maior taxa de potabilidade (KUKIĆ et al., 2012). Existem diversos processos de purificação de água, mas só se tem afirmado na literatura que a retenção de sais dissolvidos se faz através de processos térmicos e de membranas como, por exemplo, as utilizadas na osmose reversa (RODRIGUES, 2016). A Figura 2 ilustra particularidades do processo de osmose reversa.

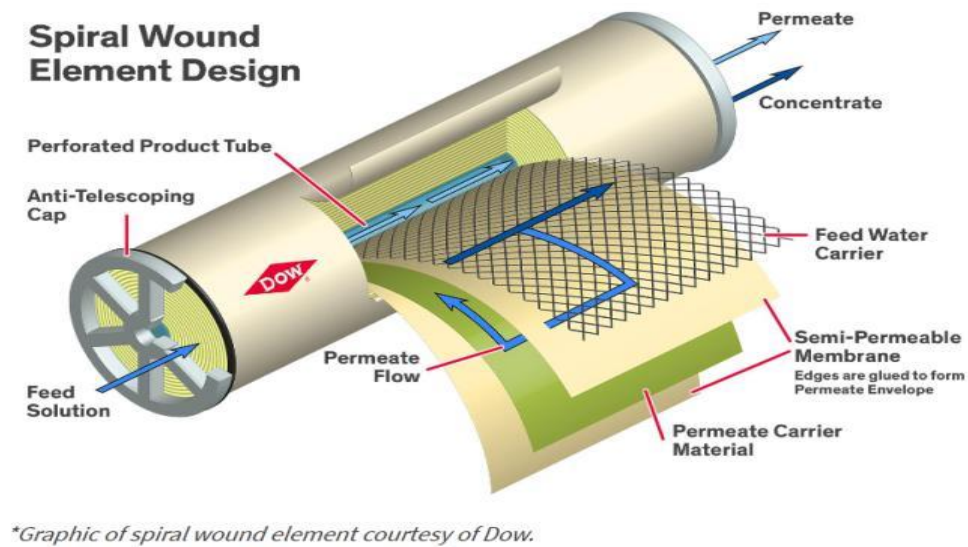


Figura 2 – Elementos de composição interna da membrana filtrante da DOW

Adaptado de: BLACKMORE (2016)

3.4. Radiação Ultrassônica

O Ultrassom (US) é gerado pela energia elétrica fornecida a um material piezoelétrico denominado transdutor, no qual os materiais piezoelétricos convertem energia elétrica em vibrações de uma determinada frequência (CHENG et al., 2015). Quando a pressão mecânica é aplicada a duas faces opostas de um cristal, uma carga elétrica igual e oposta é desenvolvida na outra face, resultando em uma diferença de potencial. Por outro lado, quando as faces opostas do cristal são colocadas sob diferença de potencial, uma mudança na dimensão (uma contração ou expansão) nas outras faces ocorreria de acordo com a direção da diferença de potencial aplicada (FIROUZ; FARAHMANDI; HOSSEINPOUR, 2019). Esse fenômeno é chamado de efeito piezoelétrico. Quartzo, Turmalina e Sal de Roche são exemplos em que o efeito piezoelétrico tem sido observado.

O ultrassom é definido como ondas mecânicas de frequência mais elevadas que a máxima frequência perceptível pelo ouvido humano, logo, maiores que 16 kHz (Figura 3). Este limite varia de pessoa para pessoa e é de aproximadamente 20 kHz em adultos jovens saudáveis (TSAI; YU-JEN; CHIU, 2020).

O ultrassom propaga-se em fluidos e sólidos e para que a transmissão ocorra, é necessário que o meio empregado tenha propriedades elásticas, podendo esta propagação produzir efeitos químicos e mecânicos no meio (POWLES et al., 2018). Para esses mesmos autores as ondas ultrassônicas podem ser utilizadas em alta frequência (100 kHz - 1 MHz) e baixa potência (menor que 1 W/cm²), sendo estas geralmente utilizadas em análises não-destrutivas. As de baixa frequência (20 kHz - 100 kHz) e alta potência (10 W/cm² - 1 kW/cm²) são utilizadas para alterar propriedades físicas e químicas da matéria, sendo esta última ação conhecida como sonoquímica.

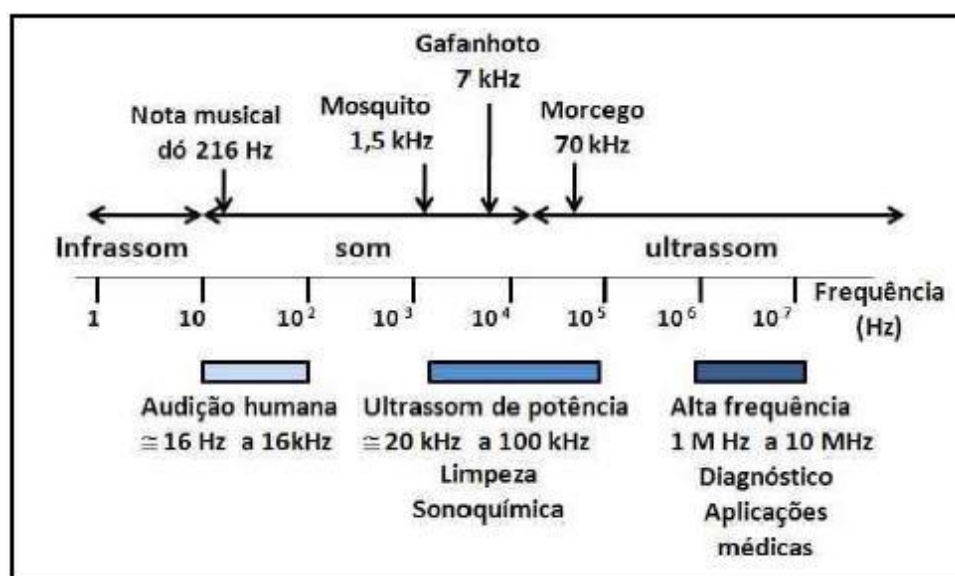


Figura 1 - Espectros de ondas sonoras.

Adaptado de: Rocha, Mainier e Alves (2011).

Os sistemas de produção de ondas ultrassônicas consistem em um gerador, um transdutor e um sistema de aplicação. No gerador produz-se energia mecânica ou elétrica enquanto em um transdutor converte-se essa energia em energia sonora em frequências ultrassônicas. Um transdutor de ultrassom converte energia elétrica em energia de ultrassom e vice-versa. Os transdutores para imagens de ultrassom consistem em um ou mais cristais piezoelétricos ou elementos. As propriedades básicas dos transdutores de ultrassom são: ressonância, frequência resposta, foco, etc. Esses transdutores são feitos de materiais piezoelétricos. Certos cristais naturais como o quartzo e a turmalina são piezoelétricos. Outros tornam-se artificialmente como o sulfato de lítio, o titanato de bário e o titanato de zirconato de chumbo (PZT) (KOBAYASHI; JEN, 2004).

O efeito piezoelétrico é exibido por certos cristais que, em resposta à aplicação pressão, desenvolvem uma tensão em superfícies opostas. Esse efeito é usado para emitir um sinal elétrico em resposta às ondas incidentes de ultrassom. A magnitude do sinal elétrico varia diretamente com a pressão das ondas incidentes de ultrassom. Da mesma forma, a aplicação de uma tensão através do cristal causa deformação do cristal - compressão ou extensão, dependendo da polaridade da tensão (KAŽYS; VOLEIŠIS; VOLEIŠIENĖ, 2008). Este efeito de deformação, denominado efeito piezoelétrico inverso, é usado para produzir um feixe de ultrassom de um transdutor. Segundo ainda os referidos autores muitos cristais exibem o efeito piezoelétrico a baixas temperaturas, mas não são transdutores adequados de ultrassom, porque suas propriedades piezoelétricas não existem em certas temperaturas. A temperatura acima da qual as propriedades piezoelétricas de um cristal desaparecem é conhecido como o ponto Curie do cristal.

O ultrassom é conhecido como uma nova tecnologia verde devido ao seu papel na sustentabilidade ambiental. As ondas de ultrassom são classificadas em quatro categorias diferentes com base no modo de vibração das partículas no meio, em relação à direção de propagação a onda, a saber, ondas longitudinais, ondas transversais e ondas de superfície (AYDIN; AYDIN, 2018). Tal tecnologia parece ser muito eficaz para intensificar o processamento químico e mecânico na área específica de tratamento de efluentes. Entre os tratamentos físicos, este processo inovador assume um papel de maior destaque, principalmente devido à sua facilidade de operação, flexibilidade e capacidade de variar as intensidades necessárias das condições de cavitação (FATYUKHIN et al., 2022). Assim, é também importante estudar o uso da US como técnica de tratamento isolada em ambientes com escassez de água devido a uma possível redução de substâncias químicas.

Os cinco sentidos dos seres vivos (visão, audição, tato, olfato e paladar) desempenham papéis importantes para a sobrevivência do homem sobre a Terra. Dois deles, visão e audição, são essenciais para a interação de longo alcance, enquanto os outros três têm funcionalidade essencialmente de curto alcance. Mas as coisas são diferentes debaixo d'água; a visão perde todo o significado como uma capacidade de longo alcance. Assim, por padrão, as ondas sonoras realizam essa detecção de longo alcance sob a água. As formas mais altamente desenvolvidas e inteligentes de vida subaquática (baleias e golfinhos, por exemplo) ao longo de uma escala de tempo de milhões de anos aperfeiçoaram sistemas sofisticados de detecção de alcance, identificação de alvos e comunicação por meio de ultrassom. No campo da tecnologia, essa propagação ultrassônica começou para o homem com o desenvolvimento de transdutores subaquáticos durante a Primeira Guerra Mundial. A água é um meio natural para a transmissão eficaz de ondas acústicas em grandes distâncias; e é de fato, para o caso de transmissão em meios opacos, que o ultrassom se destaca (GRAFF, 1981).

A cavitação pode ser descrita como a ruptura de um líquido a uma temperatura razoavelmente constante por uma pressão externa (P) que cai abaixo da pressão de vapor saturado do líquido (P_v). A tensão de tração ($P_v - P$) separa as moléculas e cria um vácuo/vazio chamado bolha de cavitação (LAUTERBORN; METTIN, 2015). A cavitação é um processo nucleado, o que significa que é formado a partir de um "ponto fraco" preexistente no líquido, como uma impureza/contaminante, gás dissolvido ou bolsa de gás. A nucleação pode ser homogênea se microbolhas temporárias forem formadas devido ao movimento térmico dentro do líquido, que serve como ponto para a criação e crescimento de bolhas de cavitação. Às vezes, o ponto de nucleação pode estar em um limite entre as partículas líquidas e sólidas ou uma parede sólida chamada nucleação heterogênea. A cavitação é diferente da ebulição na medida em que a primeira ocorre a uma temperatura razoavelmente constante, mas sob uma diminuição da pressão, enquanto a segunda ocorre a pressão constante, mas através de um aumento da temperatura (BHANGU; ASHOKKUMAR, 2016).

Como se sabe toda substância é constituída em sua microestrutura por partículas. Uma vez que esta substância seja composta de pequenas partículas de matéria, as quais estão interligadas por forças elásticas, conseqüentemente estas mesmas partículas podem se mover em relação às suas posições de equilíbrio (Figura 4).

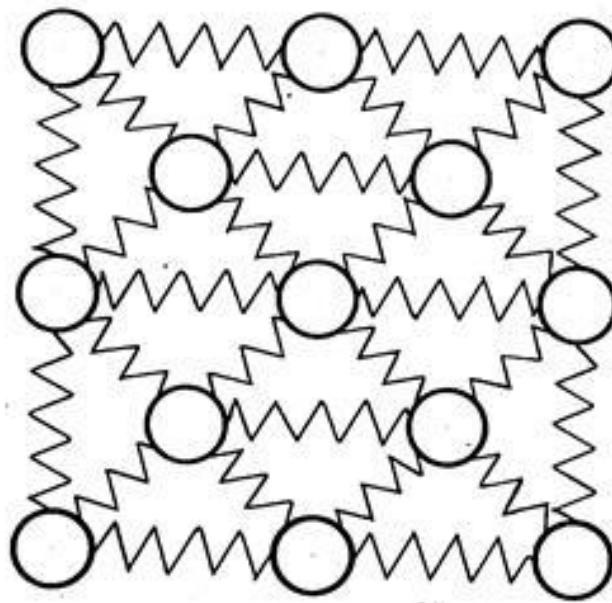


Figura 2 - Modelo simplificado da microestrutura de um meio.

Adaptada de: Kertzfield; Litovitz (1959).

Quando uma partícula é impulsionada, ela começa a vibrar e passa sua energia para as partículas adjacentes. Desse modo, a energia se propaga de uma partícula para as outras partículas da substância. O número de vibrações na unidade de tempo (frequência) é responsável pela geração de ondas na amplitude de infrassom, som audível

ou ultrassom. É importante salientar que as partículas do meio em que se propaga a energia não caminham junto com a onda e sim executam um movimento de vibração ao longo de um eixo orientado (LEIGHTON, 2007)

De acordo com Soares (2018), as ondas ultrassônicas são classificadas como ondas mecânicas, pois, precisam de um meio material para se propagar. Durante essa propagação, elas não transportam matéria, mas somente energia, fazendo com que as partículas que compõem o meio oscilem. Deste modo, o material sofre deformações elásticas com a passagem da onda. De acordo com Mehta e Monteiro (2008), dependendo da direção da oscilação das partículas em relação à direção de propagação da onda podem existir quatro modos de propagação da onda no material: ondas longitudinais também conhecidas como ondas de compressão ou primárias (P), ondas transversais também conhecidas como ondas de cisalhamento ou secundárias (S), ondas Rayleigh e ondas de Love. As ondas Rayleigh e Love são ondas de superfície, pois se propagam na superfície dos meios.

As ondas longitudinais percorrem o meio por séries alternadas de compressão e rarefação, de forma que as partículas transmitem a vibração na mesma direção de propagação da onda, como pode ser visto na Figura 5.

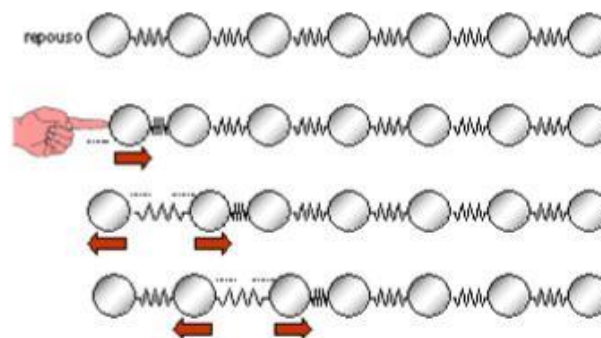


Figura 3 - Propagação de ondas longitudinais.

Fonte: Andreucci (2016).

À medida que uma onda longitudinal se move através de um meio, as moléculas na borda da onda deslizam umas pelas outras. A resistência a esse efeito de cisalhamento faz com que essas moléculas se afastem um pouco em uma direção da onda longitudinal em movimento. Este movimento transversal de moléculas ao longo da borda da onda longitudinal estabelece ondas de cisalhamento que irradiam transversalmente a partir da onda longitudinal. Em geral, as ondas de cisalhamento são significativas apenas em um meio rígido, como um sólido. Na Figura 6 pode-se perceber como se comporta uma onda transversal.

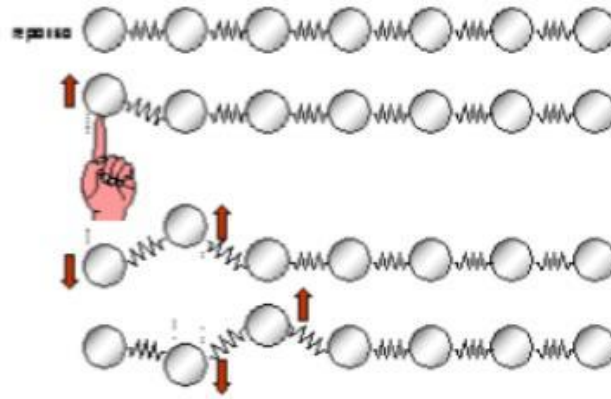


Figura 4 - Propagação de ondas transversais.

Adaptada de: Andreucci (2016).

As ondas superficiais ou Ondas de Rayleigh são assim chamadas pelas características de se propagar na superfície dos sólidos. Devido ao complexo movimento oscilatório das partículas da superfície (Figura 7), a velocidade de propagação desse tipo de onda entre duas fases diferentes é de aproximadamente 10% inferior a uma onda transversal.

Outro tipo de onda superficial que não possui a componente normal, portanto se propaga em movimento paralelo à superfície e transversal em relação a direção de propagação, recebe a denominação de ondas de “Love” (Figura 8). Sua aplicação se restringe ao exame de finas camadas de material que recobre outro material.

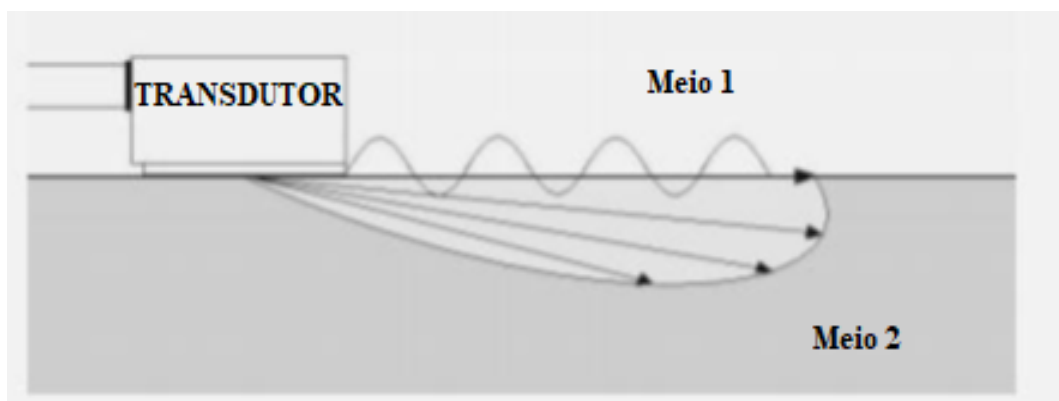


Figura 5 - Ondas superficiais de Rayleigh.

Adaptada de Soares (2018).

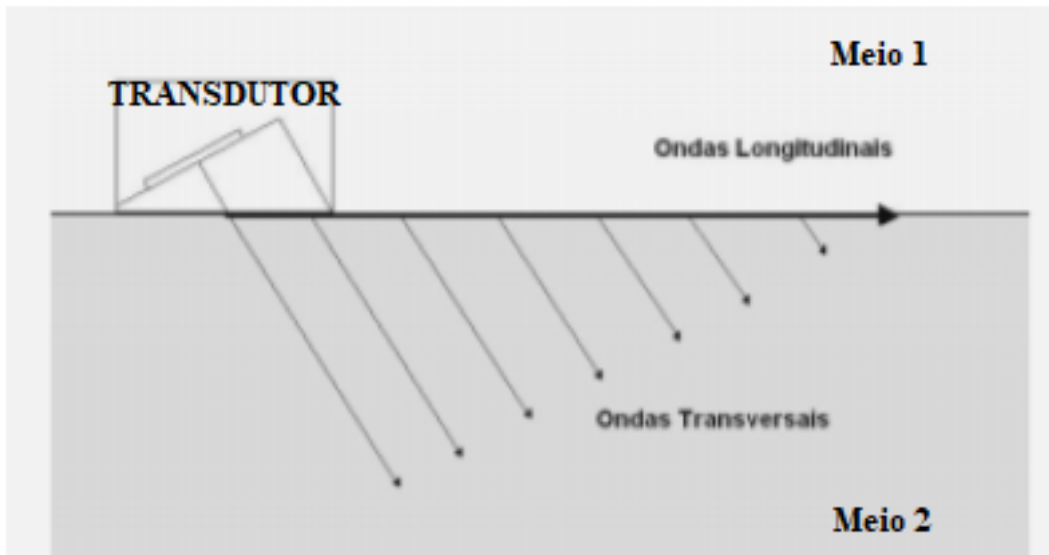


Figura 6 - Ondas superficiais de "Love".
Adaptado de Soares (2018).

Para ondas superficiais que se propagam com comprimento de onda próximo à espessura da chapa ensaiada, a inspeção não se restringe somente à superfície, mas a todo o material. Nesta particularidade denomina-se este tipo de onda como Ondas de "Lamb" (Figura 9).

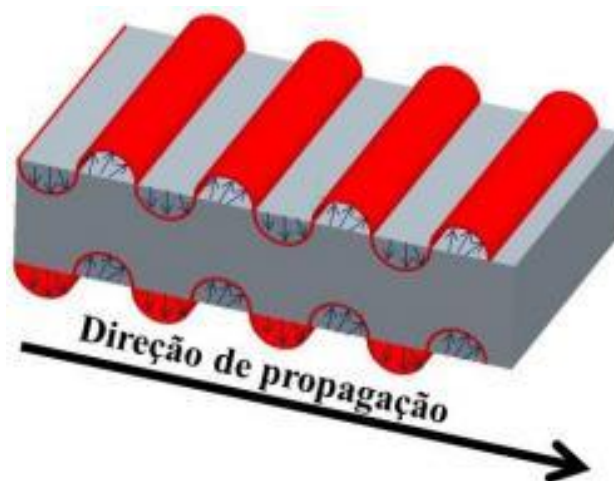


Figura 7 - Ondas de Lamb.
Adaptada de Rodovalho (2012).

A intensidade do US é geralmente descrita em relação a alguma intensidade de referência. Por exemplo, a intensidade das ondas de ultrassom enviadas ao corpo pode

ser comparada com a intensidade do ultrassom refletida de volta à superfície pelas estruturas do corpo (MENDES, 2018). Para muitas situações clínicas, as ondas refletidas na superfície podem chegar a um centésimo de a intensidade das ondas transmitidas. Ondas refletidas em estruturas a profundidades de 10 cm ou mais abaixo da superfície podem ser reduzidas em intensidade por um fator muito maior. Uma escala logarítmica é mais apropriada para registrar dados em um intervalo de várias ordens de magnitude. Na acústica, a escala de decibéis é usada, com o decibel definido como onde 10 é a intensidade de referência.

A velocidade de uma onda ultrassônica (Tabela 2) deve ser diferenciada da velocidade de moléculas cujo deslocamento para zonas de compressão e rarefação constitui a onda. A velocidade molecular descreve a velocidade das moléculas individuais no meio, enquanto a velocidade da onda descreve a velocidade da onda ultrassônica através do meio. Propriedades do ultrassom, como reflexão, transmissão e refração, são características da velocidade da onda e não da velocidade molecular (CHAWRE, 2018).

Tabela 2 - Velocidades de propagação de ondas longitudinais em diferentes meios.

Material	Velocidade m/s
Ar	330
Alumínio	6300
Cobre	4700
Ouro	3200
Aço	5900
Aço inoxidável	5800
Nylon	2600
Óleo(SAE30)	1700
Água	1480
Prata	3600
Titânio	6100
Níquel	5600
Tungstênio	5200
Magnésio	5.800
Acrílico	2.700
Aço Inoxidável	5.800
Aço Fundido	4.800

Adaptada de Kinsler (1982).

Na medida em que um feixe de ultrassom penetra um meio, a energia é removida do feixe por absorção, dispersão e reflexão. Esses processos estão resumidos na Figura 10. Assim como nos raios X, o termo atenuação refere-se a qualquer mecanismo que remove energia do feixe de ultrassom. O ultrassom é "absorvido" pelo meio se parte da energia do feixe é convertida em outras formas de energia, como um aumento no

movimento aleatório das moléculas (WEAR, 2008). O ultrassom é "refletido" se houver uma deflexão ordenada de todo ou parte do feixe. Se parte de um feixe de ultrassom muda de direção de maneira menos ordenada, o evento geralmente é descrito como "dispersão".

Efeitos de interferência construtiva e destrutiva caracterizam os ecos de reflexões não especulares (ROSE, 2004). Como o som é refletido em todas as direções, há muitas oportunidades para as ondas percorrerem caminhos diferentes. As frentes de onda que retornam ao transdutor podem interferir de forma construtiva ou destrutiva, ao acaso. O padrão de interferência aleatória é conhecido como *speckle*.

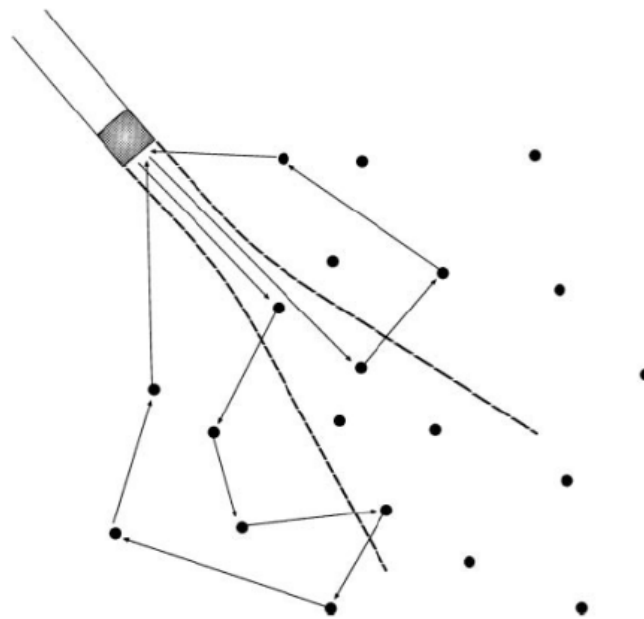


Figura 8 - Esquema ilustrativo de como as ondas ultrassônicas podem sofrer Interferências num meio.

Fonte: Adaptado de Rose (2004).

O comportamento de um feixe sonoro quando encontra um obstáculo depende do tamanho do obstáculo comparado ao comprimento de onda do som. Se o tamanho do obstáculo for grande em comparação com o comprimento de onda do som (e se o obstáculo for relativamente suave), o feixe manterá sua integridade à medida que muda de direção. Parte do feixe sonoro pode ser refletida e o restante transmitido através do obstáculo como um feixe de menor intensidade. Se o tamanho do obstáculo for comparável ou menor que o comprimento de onda do ultrassom, o obstáculo dispersará a energia em várias direções. Parte da energia do ultrassom pode retornar à sua fonte original após a dispersão "não especular", mas provavelmente não até que muitos eventos de dispersão tenham ocorrido.

Considera-se como fluido a aglomerado homogêneo, isotrópico e compressível de partículas, com pressão p_0 e massa específica μ_0 , ambos na condição de equilíbrio. Quando se aplica a lei de Newton a um elemento de volume de um fluido, necessita-se de uma equação que relacione esse aumento de pressão para alterar o volume do fluido, o

que poderá ser fornecida pela definição da compressibilidade (BIRD; STEWART; LIGHTFOO, 2002).

Se um aumento de pressão for aplicado em $t = 0$ na placa na origem, isso causará um aumento na pressão e na densidade na camada de fluido próxima a ela em relação à camada à direita. Portanto, as partículas fluirão para a direita, levando a um aumento na pressão e na densidade, e a perturbação fluirá como uma série de compressões e rarefações alternativas.

Quando uma onda de ultrassom se propaga em um meio líquido, este é submetido a um diferencial de pressão alternado que gera ciclos de compressão (pressão positiva) e rarefação (pressão negativa) de acordo com a frequência e amplitude da onda (Figura 11). Na região onde a pressão é negativa ocorrerá a formação de microbolhas e esse processo denomina-se cavitação (MEURER, 2019)

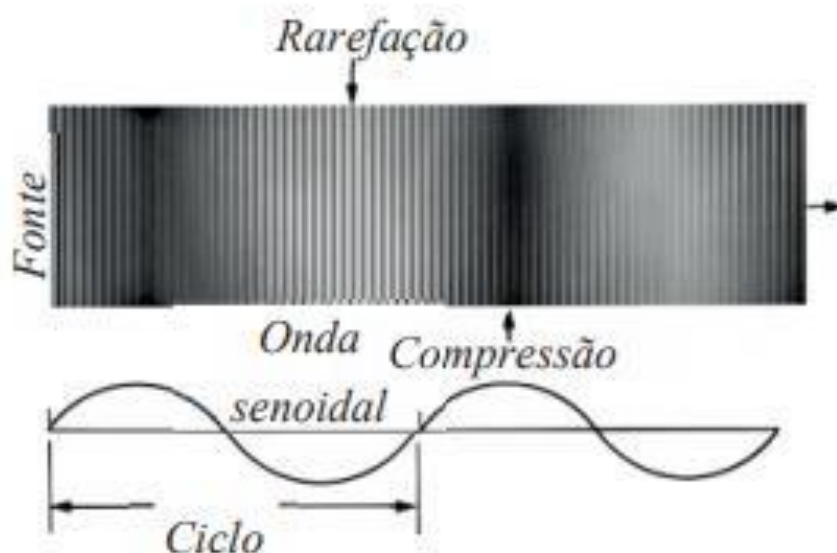


Figura 9 - Cavitação acústica. Fonte: (BARROS et al., 2019)

O processo de cavitação acústica pode ser dividido em dois tipos: cavitação inercial e não inercial, como mostra a Figura 12. A cavitação não inercial que também é conhecida como cavitação estável ocorre quando as oscilações das cavidades se tornam estáveis, ou seja, não está associada a um colapso intenso ou dispersão de energia. Contudo, tem-se também a cavitação inercial (ou cavitação transiente) acontece quando uma microbolha aumenta o seu tamanho ao longo dos ciclos de compressão e rarefação até o seu colapso violento, provocando altas temperaturas (MENDES, 2018)

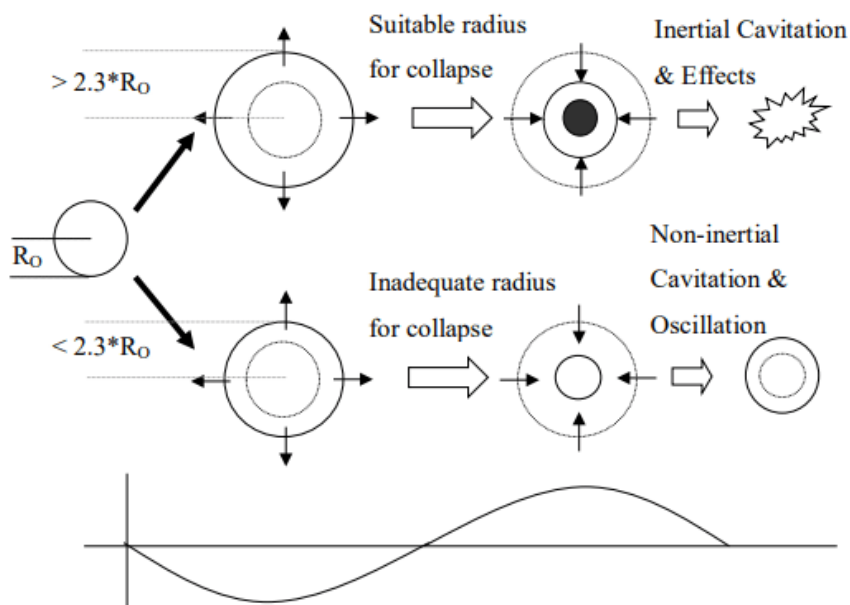


Figura 10 - Cavitação inercial e não inercial.

Adaptada de (HARVEY; GACHAGAN; MUTASA, 2014).

Na Figura 13, pode-se observar um exemplo do ciclo de formação, crescimento e colapso de uma bolha durante o processo de cavitação sônica. Esse fenômeno se destaca para processos de limpeza que utilizam ultrassom (COSTA, 2017)

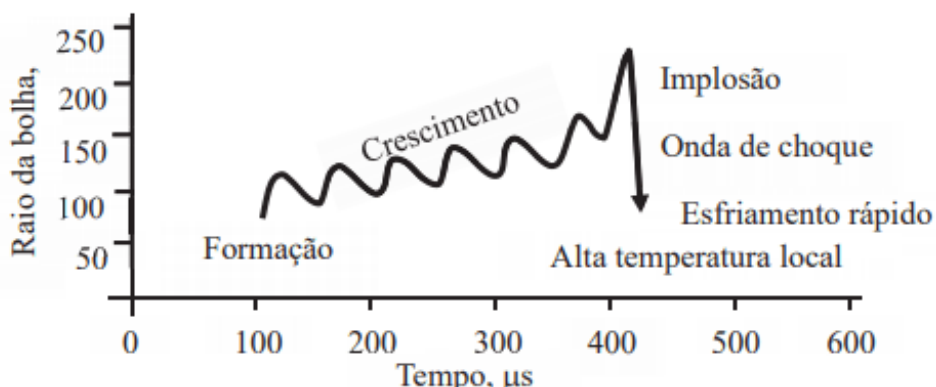


Figura 11 - Ciclo de uma bolha em um processo de cavitação inercial.

Fonte: Pang, Abdullah, Bhatia (2011).

O colapso das bolhas gera efeitos químicos e mecânicos que podem ser observados em duas regiões distintas: dentro da própria bolha, que pode ser identificado pela elevação da temperatura (cerca de 4000 K) e da pressão (cerca de 1000 atm.) e nas imediações da bolha, no qual a onda de choque produzida em colapso irá criar enormes forças de cisalhamento (RONCHI, 2014).

3.5. Ondas ultrassônicas aplicada no tratamento de água de caldeira

A aplicação de ondas de ultrassom é uma das técnicas inovadoras utilizada, associada ou isoladamente, para a melhoria dos processos de tratamento de água. Diferentes aplicações da tecnologia de ultrassom no processo de tratamento de água, como filtragem de membrana, turbidez e redução suspensão sólida total, remoção de algas, processo de desinfecção, processo de abrandamento de água e remoção de outros poluentes como halometanos e, especialmente, os Processos Oxidativos Avançados (POAs) foram pesquisados. Os resultados desses estudos mostram que esta técnica poderia melhorar o processo de tratamento de água ambientalmente. Os vários parâmetros podem afetar a eficiência da técnica de ultrassom, como densidade de energia, frequência e tempo de irradiação. Por isso, é necessário para obter a densidade de energia ideal, frequência e tempo de irradiação para chegar a custo-benefício. A maioria dos experimentos são realizados em escala laboratorial devido ao seu custo. A utilização da energia solar pode ajudar a diminuir o custo. Sugere-se que a técnica de ultrassom poderia ser estendida para limpar outros parâmetros poluídos na água e no meio ambiente (DOSTI, KARGAR, SAYADI, 2012, PAZDZIOR, BILINSKA, LEDAKOWICZ, 2019).

No Quadro 1 são ilustradas algumas investigações que foram realizadas para avaliar a eficiência dessa técnica para filtração por membrana. Cada investigação possui a potência, frequência e taxa de fluxo específicas para cada tipo de membrana.

Quadro 1 – Algumas aplicações de ultrassom em trabalhos com filtração com membranas

Ação e resultados	Frequência kHz	Potência W	Trabalho
40 kHz em sonicação por 10 minutos restaurou a vazão do permeado para mais de 95% da vazão de filtração inicial. Foram observadas dilatação e quebra dos poros da membrana na densidade de potência de 12,3 kW / m ² .	40, 68 e 170	0 a 500	LI et al., 2011
A ausência do ultrassom num processo de ultrafiltração, a uma sonicação de 28 kHz, reduziu a vazão em 50%. No processo de limpeza, a sonicação de 28 kHz recuperou mais de 200% da vazão de água.	28, 45, 100	100	CAI et al., 2010
Um controle mais efetivo da incrustação da membrana ocorreu em pH alto, baixa força iônica e na ausência de cátions bivalentes.	20	9.2 ± 0.4	CHEN et al., 2006
Em média, a vazão de permeado aumentou 50,8% para um 500 mg/L de	20	170	FENG et al., 2006

solução de CaSO ₄ e 69,7% para uma solução de CaSO ₄ a 1000 mg/L, cerca de 215% para uma solução de FeCl ₃ com 20 mg/L de Fe ³⁺ e 264% e 113%, para soluções de 500 e 1000 mg/L de CMC durante 3 h de filtração na presença de ultrassom.			
---	--	--	--

Fonte: Adaptado de Doosti, Kargar e Sayadi (2012)

A turbidez é uma das principais características físicas da água. É causada por substâncias em suspensão ou dissolvida como argila, sílica, matéria orgânica e inorgânica finamente dividida, compostos orgânicos coloridos solúveis, plâncton e outros organismos microscópicos (KUMAR; YADAV; RAWAT, 2014). Os métodos convencionais para reduzir a turbidez e os Sólidos Totais em Suspensão (STS) no processo de tratamento de água são filtração rápida e lenta, microfiltração, ultrafiltração e coagulação / floculação.

Mutiarani e colaboradores (2009) realizaram experimentos com variação de tempo, potência e variação de frequência de irradiação. Os períodos de tempo usados foram de 0,5, 1, 1,5, 2 e 2,5 horas e quatro condições de frequência e potência: 20 kHz, 25 W; 28 kHz, 30 W; 45 kHz, 40 W; 200 kHz, 100 W. Observou-se que a frequência mais efetiva da variação foi de 28 kHz com eficiência de 75% em 40 Watts de potência, enquanto a potência mais efetiva foi de 60 Watts com 76% de eficiência em 28 kHz de frequência. Também foi investigada a redução da turbidez a 28 kHz de frequência em 1 hora do tempo de irradiação com variação de potência. Foi demonstrado que, para a frequência de 28 kHz, a maior redução de turbidez (76%) é de 60 W.

Em outro estudo, um gerador ultrassônico operando a jato de ar comprimido (bocal ultrassônico) provoca frequência 27,2 kHz em uma câmara com a água a ser tratada (STEFAN; BALAN, 2011). Verificou-se que a turbidez da água diminuiu 4 vezes em comparação com a turbidez inicial de 39 NTU. Além disso, os efeitos da duração da irradiação na redução da turbidez mostraram-se que, em 5 segundos de tratamento sônico da água, a turbidez diminuiu 5-7 vezes. As desvantagens da técnica foram associadas à instabilidade do sistema que se mostrou com dificuldades de controle das condições operacionais.

Um estudo sobre a redução dos TSS devido a várias irradiações ultrassônicas de densidade de potência foi realizado por Chua e colaboradores (2010). Para toda a densidade de potência, a redução percentual do TSS aumentou significativamente com 30 min de irradiação ultrassônica, mas tornou-se instável de 60 min a 120 min de irradiação. A maior porcentagem de redução foi de 84%, que caiu 0,024 W/cm³ com duração de 120 min, enquanto a menor redução percentual foi de 60%, em 0,06 W/cm³, durante 60 minutos.

A dureza da água é conhecida como existência de cátions bivalentes e trivalentes, como cálcio (Ca^{2+}), magnésio (Mg^{2+}) e em traços inferiores; alumínio (Al^{2+} , Al^{3+}) e ferro (Fe^{2+} , Fe^{3+}) que dentre esses cátions, Ca^{2+} e Mg^{2+} são os principais fatores de dureza (VIKULINA; VIKULIN, 2018). A dureza da água causa alguns problemas, como formação de incrustações em tubos e torre de resfriamento, reação por sabão e formação de espuma dura e diminuição da capacidade de troca de calor em caldeiras, além do entupimento de membranas utilizadas em filtração e osmose (PARK et al., 2007). A intensificação do processo de liberação de íons (Ca^{2+} e Mg^{2+}) da água sob a condição de exposição ao ultrassom pode ser realizada de duas maneiras (VORONOV; PERVOV; SOMOV, 2016):

- Devido ao suprimento externo de energia, um certo número de átomos é dividido em um grupo hidroxila livre OH^{\bullet} e um átomo de hidrogênio livre H^{\bullet} os grupos hidroxila podem entrar no composto com íons (Ca^{2+} e Mg^{2+}) e reagentes. Das reações químicas que ocorrem nos processos de amolecimento, a atração de grupos hidroxila livre OH^{\bullet} aos íons Ca^{2+} e Mg^{2+} é característica. Se a reação dos íons OH^{\bullet} com a impureza for mais intensa do que sua ação no reagente, o efeito da hidroxila livre é o mesmo que se uma quantidade adicional de reagente fosse adicionada à água;

- Devido à intensa mistura da massa líquida, os processos de difusão e liberação do meio sólido são acelerados com o abrandamento do reagente. Considera-se com mais detalhes uma possível influência dos íons OH^{\bullet} adicionais (hidroxilas livres) na complementação do processo de separação dos produtos de reação de CaCO_3 e $\text{Mg}(\text{OH})_2$ da massa de água.

Os métodos convencionais para remoção de dureza são: processo de soda-cal, troca iônica, eletrocoagulação, eletrodialise e nanofiltração. Entezari e Tahmasbi (2009) usaram irradiação ultrassônica combinada nos EUA operando a 20 kHz e processo de troca iônica para remoção da dureza da água. Eles usaram o copolímero de estireno-divinilbenzeno com o grupo ácido sulfônico como uma resina cátion ácida forte. Efeito de parâmetros diferentes, como tempo de contato, quantidade de solvente, temperatura e concentração de íons foram investigadas.

Serna-Galvis et al. (2016) investigaram a degradação sonoquímica de um antibiótico penicilina (oxacillin) em águas residuais farmacêuticas simuladas. O ultrassom de alta frequência foi aplicado à água contendo o antibiótico combinado com carbonato de manitol ou cálcio. Na presença de aditivos, o oxacilina foi eficientemente removido através de ação sonoquímica. Para fins comparativos, os processos de foto-Fenton, fotocatalise TiO_2 e oxidação eletroquímica também foram testados. Portanto, a evolução do antibiótico e sua atividade antimicrobiana associada (AA) foram monitoradas. Uma alta inibição foi encontrada para os outros três processos de oxidação na eliminação da atividade

antimicrobiana causada pelos aditivos; enquanto para o tratamento ultrassônico, um efeito insignificante foi observado. O processo de sonoquímico foi capaz de degradar completamente o antibiótico, gerando soluções sem AA. Na verdade, a eliminação de antimicrobianos, a atividade mostrou um excelente desempenho ajustado à deterioração exponencial do tipo cinético. Os principais subprodutos orgânicos sonogerados foram determinados por meio de HPLC-MS. Quatro intermediários foram identificados que modificaram a estrutura penicilina, que é responsável pela atividade antimicrobiana. Além disso, o possível mecanismo de sonodelito oxacilina foi proposto com base na evolução dos subprodutos e sua estrutura química. Além disso, o ultrassom de alta frequência com ação mais de 120 min removeu prontamente a oxacilina e eliminou sua atividade antimicrobiana. No entanto, o poluente não foi mineralizado mesmo após um longo período de irradiação ultrassônica (360 min). Curiosamente, a água previamente sônica contendo oxacilina e ambos os aditivos foi completamente mineralizada usando microrganismos não adaptados de uma estação municipal de tratamento de águas residuais. Estes resultados mostram que o tratamento sonoquímico transformou o poluente inicial em substâncias que são biotratáveis com um sistema biológico aeróbico típico.

Pré-tratamento ultrassônico de água bruta com alto teor de células de algas pode causar um aumento no nitrogênio orgânico dissolvido (DON) e proteínas, que devem ser removidos de forma eficaz antes da coagulação. No estudo realizado por Liu et al. (2017), a eficiência do tratamento de sonorização (sonicação) na remoção de proteínas típicas derivadas de células de algas foi investigada através da aplicação de ondas ultrassônicas em 20, 40, 60, 80 e 100 kHz, e os fatores de influência e mecanismo de remoção foram discutidos. Os resultados mostraram que a sonorização de baixa frequência poderia degradar a filocianina até certo ponto, alcançando cerca de 95% da taxa de remoção após 150 min de sonicação. No entanto, a análise da matriz de emissão de excitação indicou que a ultrassomização não poderia degradar totalmente a filocianina em nitrogênio inorgânico, e muitas proteínas e orgânicos contendo nitrogênio foram encontrados nas amostras após a sonorização. Enquanto a concentração total de nitrogênio permaneceu consistente durante todo o processo de sonorização (240 min), a concentração total de nitrogênio inorgânico aumentou de 0,6 para 1,3 mg/L, indicando que apenas 33,3% do DON foi oxidado em nitrogênio inorgânico. No entanto, a sonorização pode atenuar significativamente a interferência da filocianina na coagulação e melhorar a coagulação. Os efeitos mecânicos e a oxidação de radicais livres resultantes do colapso da cavitação podem ser responsáveis pela degradação da fitocianina e das proteínas após a sonorização (sonicação). Ao todo, o uso de tratamento ultrassônico como um pós-tratamento após a sonorização para remover as células de algas da água crua pode não ser benéfico.

A utilização de esquemas de tratamento híbrido envolvendo processos avançados de oxidação e cavitação hidrodinâmica no tratamento de efluentes constitui o foco principal dos estudos desenvolvidos por Barik e Gogate (2018). A fase inicial do trabalho desses autores inclui a análise de literatura recente relacionada ao desempenho da abordagem combinada baseada na cavitação hidrodinâmica (HC) para degradação de diferentes poluentes, seguida de uma investigação detalhada sobre a degradação do 2,4,6-triclorofenol (2,4, 6-TCP). A degradação do poluente prioritário, 2,4,6-TCP, usando a combinação de HC baseada em furos-venturi usados como dispositivo de cavitação, ozônio e H_2O_2 , foi investigada. O efeito da pressão operacional (2-5 bar) e do pH inicial (3-11) foi analisado para a degradação usando apenas HC. A degradação usando apenas ozônio (100-400 mg/h) e apenas H_2O_2 também foi estudada. A eficácia da operação combinada de HC + O_3 em diferentes taxas de fluxo de ozônio (100-400 mg/h) e a operação combinada de HC + H_2O_2 em diferentes cargas de H_2O_2 (2,4,6-TCP: H_2O_2 como 1: 1 - 1: 7) foram posteriormente investigados. A eficácia da degradação também foi estabelecida para as estratégias de tratamento combinadas de O_3 + H_2O_2 e HC + O_3 + H_2O_2 nas condições ideais de temperatura de 30°C, pressão de entrada de 4 bar e pH inicial de 7. Extensão de 2,4, a degradação por 6-TCP, remoção de COT e DQO obtida no processo HC + O_3 foram de 97,1%, 94,4% e 78,5%, respectivamente, enquanto no processo O_3 + H_2O_2 , os valores foram de 95,5%, 94,8% e 76,2% e no processo HC + O_3 + H_2O_2 processo como 100%, 95,6% e 80,9% na mesma ordem. A abordagem de tratamento combinado como HC + O_3 + H_2O_2 foi estabelecida como a abordagem mais eficiente e bem-sucedida para remoção completa de 2,4,6-TCP com remoção quase total de TOC.

Os processos ultrassom e foto-Fenton foram investigados por Papoutsakis et al. (2015) para o tratamento de meios aquáticos contaminados com o agente de contraste iodado Iohexol. O Iohexol é introduzido principalmente na rede de água de hospitais que descarregam a urina de pacientes submetidos a imagens médicas. As opções de tratamento foram consideradas para eliminar soluções altamente concentradas (até 6 g/L) na fonte hospitalar (na urina) ou altamente diluídas (na mg/L dentro das águas residuais municipais). Embora a eficiência do ultrassom tenha se mostrado baixa, a remoção completa do Iohexol foi alcançada pela aplicação do foto-Fenton na urina diluída.

Foram realizadas aplicações de US de 20 e 850 kHz como processo de pré-tratamento para melhorar a eficiência do hipoclorito de sódio para a inativação de E. coli. A aplicação de 850 kHz como pré-tratamento, foi muito eficaz a 1 min de exposição e a aplicação de 20 kHz com simulação de tratamento aplicado com cloração foi melhor usando um período menor (DUCKHOUSE et al., 2004).

A aplicação de ultrassom operando a 36 kHz e 200 W na ausência e presença de 1,0 g/ml de dióxido de titânio (TiO_2) foi avaliada quanto à inativação de *Legionella*. Como mostrado no estudo, sem TiO_2 apenas 18% das células viáveis de *Legionella* foram inativadas, enquanto com TiO_2 conseguiu-se uma inativação de 97% após 30 minutos (SHIMIZUA et al., 2010).

MAHAMUNI e ADEWUYI, (2010) fizeram uma tentativa de estimar o custo do tratamento de águas residuais usando ultrassom. Os custos foram calculados para 1000 Estações de tratamento com capacidade de L/min. Os custos foram calculados com base nas constantes de taxa para degradação de poluentes. Os poluentes considerados foram fenol, tricloroetileno (TCE) e corantes azo reativos. O tempo necessário para a degradação de noventa por cento do poluente foi considerado o tempo de permanência. A quantidade de energia necessária para atingir a degradação alvo foi calculada a partir da densidade de energia (W/mL) usada no estudo de tratamento. O custo do tratamento foi calculado considerando o custo de capital e o custo operacional envolvidos no tratamento de águas residuais. Foram solicitadas cotações dos fornecedores para determinar o custo de capital dos equipamentos envolvidos e os custos operacionais foram calculados com base no uso anual de energia. O custo foi expresso em dólares por 1000 galões de águas residuais tratadas. Esses custos de tratamento foram comparados com outras tecnologias estabelecidas do processo oxidativo avançado (AOP). O custo do tratamento de águas residuais para fenol era na gama de US\$ 89 por 1000 galões por UV/US/ O_3 a US\$ 15536 por 1000 galões por US sozinho. Esses custos para o TCE estavam na faixa de US\$ 25 por 1000 galões a US\$ 91 para o tratamento com US+ UV e somente com US, respectivamente. O custo do tratamento de águas residuais para corantes azo reativos estava na gama de \$65 por 1.000 galões por US+UV+ H_2O_2 para US\$ 14203 por 1.000 galões por US sozinho.

Para atingir as características necessárias para uso em caldeiras e sistemas de cogeração, a água deve passar por um processo de desmineralização, que atualmente pode ser feito por meio de duas tecnologias: resinas de troca iônica e membranas de osmose reversa (Čuda; Pospíšil; Tenglerová, 2006). Caso essas especificidades não sejam atendidas, ambas as águas podem causar transtornos à linha de produção. A água industrial em condições inadequadas pode reduzir drasticamente o intervalo entre as manutenções da caldeira, interrompendo a produção da planta e levando ao aumento do consumo de reagentes químicos. Com o objetivo de reduzir a quantidade de produtos químicos, a literatura tem apresentado um número crescente de técnicas de tratamento físico de água, dentre as quais se destaca o uso de ultrassom (US) (Fetyan e Attia, 2020; Chong et al., 2010).

Um processo ultrassônico típico é quando o transdutor opera em uma frequência entre 20 kHz e 600 kHz. Nessa faixa de frequência, são geradas microbolhas com diâmetros médios de 150 μm , dando origem à energia de cavitação quando tais microbolhas colapsam (Huggi e Mise, 2019). Na parte baixa desta faixa de frequência utilizou-se ultrassom para reduzir o TDS e verificou a eficiência do tratamento para uma frequência de 28 kHz, 60 Watts de potência, tendo alcançado uma redução de turbidez de 76%. Com 27,2 kHz, por 30 segundos, a turbidez da água diminuiu 4 vezes (Stefan; Balan, 2011).

Nos processos de ultrassom de alta frequência, entre 600 kHz e 5 MHz, são geradas microbolhas menores e, quando colapsam, produzem uma quantidade proporcionalmente menor de energia de cavitação (Leong; Juliano; Knoerzer, 2017). Ainda de acordo com Leong, Juliano e Knoerzer (2017) na vaporização da água, obtida com o auxílio da energia vibratória de um emissor ultrassônico de alta frequência, as moléculas do líquido também vibram em altíssima velocidade (cerca de 2 MHz). Durante a amplitude negativa do ciclo do transdutor, são criados vazios repentinos que causam a produção de microbolhas, que são empurradas para a superfície da água durante a amplitude positiva do ciclo. Esse efeito é propriamente chamado de cavitação megasônica (Chun-Lin; Te-Yun; Yiin-Kuen, 2020).

Entezari e Tahmasbi (2009) usaram ondas ultrassônicas de 20 kHz combinadas com o processo de troca iônica para remover a dureza da água. Eles usaram resina catiônica de copolímero de estireno-divinilbenzeno. Eles estudaram o efeito de parâmetros como tempo de contato, quantidade de sorvente, temperatura e concentração de íons. Hiratsuka e Pathak (2013) utilizaram irradiação ultrassônica de 28 kHz, não identificando vantagens para a eficiência do tratamento com tempos de sonicação entre 10 e 30 minutos, para amaciamento de seis diferentes tipos de água potável. Esses autores obtiveram diferentes reduções de dureza com diferentes níveis de pH: 60 \rightarrow 35 (pH=7,0-7,7); 15 \rightarrow 5 (6,7-8,3); 32 \rightarrow 15 (pH: 8,3-8,5); 304 \rightarrow 100 (pH: 7,2-7,8); 315 \rightarrow 150 (pH: 7,8-8,2); 1468 \rightarrow 150 (7,4-7,8).

Durante sua ocorrência, as ondas ultrassônicas de alta frequência (HFSU) também podem ser usadas para modificar as propriedades físico-químicas da água. Essas ondas se propagam sob a superfície livre do líquido, causando a evaporação de gotículas de água muito pequenas. A técnica de umidificação ultrassônica e desumidificação do ar atmosférico (HDH) têm sido utilizadas em um sistema híbrido para alterações no teor de sais contidos em água salobra (Tourab et al., 2020; El-Maghlany et al., 2018). A concentração de sais na água de alimentação de um sistema de dessalinização ultrassônica proposto por Hosseingholiloua, Banakara e Mostafaeib (2019), na faixa de

5.000 a 15.000 mg/L), foi o fator que mais contribuiu para a eficiência da dessalinização. Para isso, um fluxo de ar quente foi criado pelos autores utilizando um ventilador e dois elementos térmicos ao longo de um canal de ar. Além desse canal de ar quente, o arranjo experimental consistiu em uma câmara de atomização ultrassônica para água salobra e uma câmara de mistura de ar quente com vapor salino, onde também havia a separação do excesso de água e da água responsável pela supersaturação do ar. (Niam; Sucahyo, 2020). A jusante da câmara de separação, um condensador recuperava a água tratada. Na base da câmara de separação, uma abertura permitia o descarte de rejeitos salinos.

Como exemplo do processo de dessalinização da água em estado supercrítico, segundo Odu et al. (2015), o desenvolvimento de experimentos utilizando HFSU não deve se restringir apenas aos parâmetros responsáveis pelo HDH, pois o estado de excitação em que se encontra a água evaporada apresenta comportamento semelhante, liberando sais dissolvidos mais facilmente no meio, além de outros efeitos físico-químicos de grande importância comercial.

REFERÊNCIAS

ARACHCHIGE, U.S. P. R.; SAKUNA SANDUPAMA P.W. Purpose of purifying industrial boiler water. **International Journal of Research** 2019, Volume 06 Issue 04, 634-636. Available online: <http://edupediapublications.org/journals/index.php/IJR/>

AYDIN, T.Y., AYDIN, M., 2018. Effect of density and propagation length on ultrasonic longitudinal wave velocity in some important wood species grown in Turkey. *Turkish Journal of Forestry*, 19(4): 413-418. DOI: 10.18182/tjf.459005

BARROS, T. R. B. et al. Estudo e Monitoramento Tecnológico da Utilização do Ultrassom em Processos Químicos e com Membranas. **Cadernos de Prospecção**, v. 12, n. 2, p. 360–360, 18 jun. 2019.

BLACKMORE, L. Autonomous precision landing of space rockets. v. 46, p. 15–20, 1 jan. 2016.

BREVIÁRIO, Á. G. DO. FLUXO DE CAIXA DESCONTADO APLICADO A OPERAÇÕES DE FUSÕES E AQUISIÇÕES: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA DA PRODUÇÃO CIENTÍFICA NACIONAL. **Aten@- Revista Digital de Gestão & Negócios** -, v. 2, n. 4, p. 67–88, 14 fev. 2022.

BARIK, A. J.; GOGATE, P. R., Hybrid treatment strategies for 2, 4, 6 – trichlorophenol degradation based on combination of hydrodynamic cavitation and AOPs, **Ultrasonics Sonochemistry**, v. 40, p. 383 – 394, janeiro, 2018.

BASHEER, E.A.M.; MAHMOOD, W. K.; ABDULBARI, H. A. In situ ultrasound enhancement of octanoic acid directional solvent extraction for seawater desalination. **Chemical Engineering Communications**, v. 206, n. 7, p. 940-952, 2019. Disponível em: <https://doi:10.1080/00986445.2018.1539709>.

BHANGU, S.K.; ASHOKKUMAR, M. **Theory of Sonochemistry**, vol. 374, no. 4. Springer International Publishing, 2016.

BIRD, R.B.; STEWART, W.E.; LIGHTFOO, E.N.L. **Transport Phenomena**. 2nd Edition, New York: John Wiley & Sons, 2002.

BIZZO, W.A. **Apostila Geração, Distribuição e Utilização de Vapor** – Disponível em: (www.fem.unicamp.br). Acessado em 5 de novembro de 2019.

BJERKE, B. Membrane technology and costs: the state of art. **Desalination**, v. 35, p. 375 – 382, 2002.

CHAWRE, B. Correlations between ultrasonic pulse wave velocities and rock properties of quartz-mica schist. **Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering**. Volume 10, Issue 3, June 2018, Pages 594-602.

CHENG, X., ZHANG, M., XU, B., ADHIKARI, B., SUN. J. The principles of ultrasound and its application in freezing related processes of food materials: A review. **Ultrasonics Sonochemistry** 2015, 27, 576- 585. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2015.04.015>

CHONG, M. N.; JIN, B.; CHOW, C. W.K.; SAINT, C. (2010). Recent developments in photocatalytic water treatment technology: A review. **Water Research**, 44(10), 2997–3027. doi: 10.1016/j.watres.2010.02.039

CHUA, S.Y.; ADUL LATIF, P.; IBRAHIM, S.H., et al. 2010. Effect of ultrasonic irradiation on COD and TSS in raw rubber mill effluent. **Environment Asia**, 3 (special issue): 32-35.

CHUN-LIN, C.; TE-YUN, L.; YIIN-KUEN, F. 2020. The suitability of ultrasonic and megasonic cleaning of nanoscale patterns in ammonia hydroxide solutions for particle removal and feature damage. *Semiconductor Science and Technology*. 35 045001. *Semicond. Sci. Technol.* <https://doi.org/10.1088/1361-6641/ab675d>.

COSTA, J. G. B. **Uso combinado de Ultrassom e Peróxido de Hidrogênio para degradação do corante CI-3R em um efluente têxtil sintético**. bachelorThesis—[s.l.] Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 3 jun. 2017.

ČUDA, P.; POSPÍŠIL, P.; TENGLEROVÁ, J. Reverse osmosis in water treatment for boilers. **Desalination** 198 (2006) 41–46. doi: 10.1016/j.desal.2006.09.007.

DOBROWOLSKI, Z.; DROZDOWSKI, G. Does the Net Present Value as a Financial Metric Fit Investment in Green Energy Security? **Energies**, v. 15, n. 1, p. 353, jan. 2022.

DOOSTI, M.R.; KARGAR, R.; SAYADI, M.H. Water treatment using ultrasonic assistance: A review. **Proceedings of the International Academy of Ecology and Environmental Sciences**, 2012, 2(2):96-110.

DRAGANA V. KUKIĆ, MARINA B. ŠĆIBAN, BRANKA B. MITROVIĆ, JELENA M. PRODANOVIĆ, VESNA M. VASIĆ, DARJANA Ž. IVETIĆ & MIRJANA G. ANTOV (2012): Possibility of improvement of boiler water treatment process—ion exchange vs. reverse osmosis, **Desalination and Water Treatment**, DOI:10.1080/19443994.2012.714860

DUCKHOUSE, H.; MASON, T.J.; PHULL, S.S. (2004) The effect of sonication on microbial disinfection using hypochlorite. **Ultrasonics Sonochemistry**, 11: 173-176.

EL-MAGHLANY, W.M.; TOURAB, A.E.; HEGAZY, A.H.; TEAMAH, M.A.; HANAFY, A.A. 2018. Experimental study on productivity intensification of HDH desalination unit utilizing two-stage dehumidification. *Desalin. Water Treat.* 107, 28–40. <https://doi.org/10.5004/dwt.2018.22119>

EMARA, M.M.; ABDELAZIZB, F.; ELBARBARYC, Y.H. Physico-Chemical Studies for Boiler Water Treatment and Its Impact on the Quality of Final Industrial Product. **International Journal of Scientific and Research Publications**, Volume 6, Issue 11, November 2016.

ENTEZARI, M.H.; TAHMASBI, M. Water softening by combination of ultrasound and ion Exchange. **Ultrasonics Sonochemistry** 16 (2009) 356–360. doi: 10.1016/j.ultsonch.2008.09.008

FATYUKHIN, D.S.; NIGMETZYANOV, R.I.; PRIKHODKO, V.M.; SUKHOV, A.V.; SUNDUKOV, S.K. A Comparison of the Effects of Ultrasonic Cavitation on the Surfaces of 45 and 40Kh Steels. **Metals** 2022, 12, 138. <https://doi.org/10.3390/met12010138>

FEDOSEEVA, E.B. The use of reverse osmosis technology for water treatment in power engineering, **Therm. Eng.** 53(6) (2006) 439–443.

FETYAN, N.A.H.; ATTIA, T.M.S. Water purification using ultrasound waves: application and challenges. **Arab Journal of Basic and Applied Sciences** 2020, Vol. 27, No. 1, 194–207 <https://doi.org/10.1080/25765299.2020.1762294>

FIDELIX, T. L. S. Tratamento de água produzida para a geração de vapor utilizado na injeção em poços de petróleo. Trabalho de conclusão de Curso de Engenharia de Petróleo da UFRN. 2017, 58 p.

GABOARDI, B.; FERREIRA, M. M.; SILVA, F. M. A importância da demonstração do fluxo de caixa como ferramenta gerencial. **RGSN - Revista Gestão, Sustentabilidade e Negócios**, Porto Alegre, v.8, n.1, p. 17-35, jun. 2020.

GAUTAM, S.; SAINI, G. Use of natural coagulants for industrial wastewater treatment. **Global J. Environ. Sci. Manage.** 2020(4): 553-578, DOI: 10.22034/gjesm.2020.04.10

GLARER, Julius. The early history of reverse osmosis membrane. **Desalination**, p. 297-309, 7 June 1998.

GOUVÊA, C. A. K.; HURTADO, A. L. B.; BORZIO, R. F.; FOLLETO, M. A. Uso de água tratada por osmose reversa para a geração de vapor em indústria de tabaco. **Revista Produção**, v.12, n. 2, p. 522-536, 2012.

GRAFF, K.F., **A history of ultrasonics in Physical Acoustics**, XV, Mason, W.P. and Thurston, R.N., Eds., New York: Academic Press, 1981.

HARVEY, G.; GACHAGAN, A.; MUTASA, T. Review of high-power ultrasound-industrial applications and measurement methods. **IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control**, v. 61, n. 3, p. 481–495, mar. 2014.

HASNAIN, S. et al. Selection of an industrial boiler for a soda-ash production plant using analytical hierarchy process and TOPSIS approaches. **Case Studies in Thermal Engineering**, v. 19, p. 100636, 1 jun. 2020.

HIRATSUKA, A.; PATHAK, D.R. Application of Ultrasonic Waves for the Improvement of Water Treatment. **Journal of Water Resource and Protection**, 2013, 5, 604-610 <http://dx.doi.org/10.4236/jwarp.2013.56061>

HOSSEINGHOLILOUA, B.; BANAKARA, A.; MOSTAFAEIB, M. (2019). Design and evaluation of a novel ultrasonic desalination system by response surface methodology. **Desalination and Water Treatment**, 164, 263-275. doi: 10.5004/dwt.2019.24458

HUGGI, M.; MISE, S.R. 2019. Optimized Ann Model For Ultrasonication Wastewater Treatment Process. *International Journal of Advanced Research in Engineering and Technology (IJARET)*. 10, (3), 94-102.

KAŽYS, R.; VOLEIŠIS, A.; VOLEIŠIENĖ, B. High temperature ultrasonic transducers: review. **ULTRAGARSAS**, Vol.63, No. 2, 1392-2114, 2008.

KERTZFIELD, K.; AND LITOVITZ, T. **Absorption and Dispersion of Ultrasonic Waves**. New York: Academic Press, 1959.

KINSLER, L. E. **Fundamentals of Acoustics**, 3rd edition New York: John Wiley & Sons, 1982, pp. 115–117.

KLYUKIN, Y. I.; MAYER, B.; TUTOLO, B. Effect of boiler feed water composition on inorganic scaling in once-through steam generators estimated using a Monte Carlo modelling approach. **Applied Geochemistry**, v. 148, p. 105510, 1 jan. 2023.

KOBAYASHI, M.; JEN, C. K. Piezoelectric thick bismuth titanate/PZT composite film transducers for smart NDE of metals. **Smart Mat. and Structures**. 2004. Vol. 13. P. 951-956.

KUKIĆ, D.V.; ŠĆIBAN, M.B.; MITROVIĆ, B.B.; PRODANOVIĆ, J.M.; VASIĆ, V.M.; IVETIĆ, D. Ž.; ANTOV, M.G. (2012): Possibility of improvement of boiler water treatment process — Ion exchange vs. Reverse osmosis, **Desalination and Water Treatment**, DOI:10.1080/19443994.2012.714860

KUMAR, R.; YADAV, N.; RAWAT, L.; GOYAL, M.K. Effect of Two Waves of Ultrasonic on Waste Water Treatment. **J Chem Eng Process Technol**, 2014 5: 193.

LAUTERBORN, W.; METTIN, R. Acoustic cavitation: bubble dynamics in high-power ultrasonic Fields. in **Power Ultrasonics**, Elsevier Ltd., 2015, pp. 37–78.

LEIGHTON, T. G. What is ultrasound? **Progress in Biophysics and Molecular Biology**, Effects of ultrasound and infrasound relevant to human health. v. 93, n. 1, p. 3–83, 1 jan. 2007.

LEONG, T.; JULIANO, P.; KNOERZER, K. 2017. Advances in Ultrasonic and Megasonic Processing of Foods. *Food Eng Rev.* <https://doi.org/10.1007/s12393-017-9167-5>.

LIU, C.; CAO, Z.; WANG, J.; SUN, Z.; HE, S.; CHEN, W., Performance and mechanism of phycocyanin removal from water by low-frequency ultrasound treatment, **Ultrasonics Sonochemistry**, v. 34, p. 214 – 221, janeiro, 2017.

LIU, Y.; BOND, L.J.; HU, H. Ultrasonic-Attenuation-Based Technique for Ice Characterization Pertinent to Aircraft Icing Phenomena. **AIAA JOURNAL** Vol. 55, No. 5, May 2017.

MAHAMUNI, N. N.; ADEWUYI, Y. G., Advanced oxidation process (AOPs) involving ultrasound for waste water treatment: a review with emphasis on cost estimation, **Ultrasonics Sonochemistry**, v. 17, n. 6, p. 990 – 1003, agosto, 2010.

MARTINS, L. P. et al. VIABILIDADE ECONÔMICA PARA O CULTIVO DO TAMBAQUI (*Colossoma macropomum*) EM VIVEIRO ESCAVADO NO MUNICÍPIO DE URUPÁ – RONDÔNIA. **Revista de Administração e Negócios da Amazônia**, v. 12, n. 2, p. 64–89, 29 set. 2020.

MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 3.ed. São Paulo: IBRACON, 2008.

MENDES, J. F. DE B. Ultrassom focalizado de alta frequência: um tratamento não invasivo para o câncer de próstata: revisão integrativa da literatura. 2018.

MEURER, M. C. Efeitos do ultrassom nas propriedades tecnológicas da água de cozimento do grão-de-bico (aquafaba). 2019.

NIAM, A.G.; SUCAHYO, L. 2020 Ultrasonic atomizer application for Low Cost Aeroponic Chambers (LCAC): a review, IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/542/1/012034>

ODU, S. O.; VAN DER HAM, A.G.J.; METZ, S.; KERSTEN, S.R.A. Design of a process for supercritical water desalination with zero liquid discharge. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 54, n. 20, p. 5527-5535, 2015. Disponível em: doi: 10.1021/acs.iecr.5b00826

PANG, Y. L.; ABDULLAH, A. Z.; BHATIA, S., Review on sonochemical methods in the presence of catalysts and chemical additives for treatment of organic pollutants in wastewater, **Desalination**, v. 277, n. 1 – 3, p. 1 – 14, agosto, 2011.

PAPOUTSAKIS, S.; AFSHARIS, Z.; SIXTO, M.; PULGARIN, C., Elimination of the iodinated contrast agent iohexol in water, wastewater and urine matrices by application of photo-Fenton and ultrasound advanced oxidation, **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 3, n. 3, p. 2002 – 2009, setembro, 2015.

PARK, Y.M.; YEON, K.M.; PARK, C.H. Silica treatment technologies in reverse osmosis for industrial desalination: A review. **Environ. Eng. Res.** 2020; 25(6): 819-829. <https://doi.org/10.4491/eer.2019.353>

PARK, J.S.; SONG, J.H.; YEON, K.H. et al. 2007. Removal of hardness ions from tap water using lectromembrane processes. **Desalination**, 202: 1-8.

PAZDZIOR, K.; BILINKA, L.; LEDAKOWICZ, S., A review of the existing and emerging Technologies in the combination of AOPs and biological process in industrial textile wastewater treatment, **Chemical Engineering Journal**, v. 376, p. 1 – 25, novembro, 2019.

PIRES, A. L. et al. **Principais tendências e indicadores nos estudos de viabilidade econômica da energia eólica offshore: Uma revisão sistemática da literatura**. [s.l.: s.n.].

POWLES, A. E. J.; MARTIN, D. J.; WELLS, I. T. P.; GOODWIN, C. R., **Physics of ultrasound**, v. 19, n. 4, p. 202 – 205, 2018.

QASIM, M.; KHUDHUR, F. W.; AIDAN, A.; DARWISH, N. A., Ultrasound-assisted forward osmosis desalination using inorganic draw solutes, **Ultrasonics Sonochemistry**, v. 61, p. 1 – 35, setembro, 2019.

RODRIGUES, A. da L. P.; MENEZES, C. A. de S.; SANTOS, K. K. do N. Proposta de recuperação da água proveniente do processo de dessalinização por osmose reversa: um estudo de caso em uma indústria de papel e celulose. In: Anais do XXXVI Encontro Nacional de Engenharia de Produção – ENEGEP. João Pessoa, Outubro, p. 1-12, 2016.

ROSE, J. L. **Ultrasonic Waves in Solid Media**, Cambridge: Cambridge University Press, 2004.

SAJATH, S.H.M. Industrial Boiler Operation. **Journal of Research Technology and Engineering** 2020, 1(3), 89-98. ISSN 2714-1837

SANTOS, E.J.N., FRAGA, F. E. N. **A importância do tratamento e cuidados com a água de caldeira**, Universidade Federal Rural do Semi-Árido. 2018.

SERNA-GALVIS, E. A.; ISAZA-PINEDA, L.; MONCAYO-LASSO, A.; HERNANDEZ, F.; IBANEZ, M.; TORRES-PALMA, R. A., Comparative degradation of two highly consumed antihypertensives in water by sonochemical

SERNA-GALVIS, E. A.; SILVA-AGREDO, J.; GIRALDO-AGUIRRE, A. L.; FLOREZ-ACOSTA, O. A.; TORRES-PALMA, R. A., High frequency ultrasound as a selective advanced oxidation process to remove penicillinic antibiotics and eliminate its antimicrobial activity from water, **Ultrasonics Sonochemistry** – Elsevier, v. 31, p. 276 – 283, julho, 2016.

SHIMIZUA, N.; NINOMIYA, N.; OGINO, C, ET AL. 2010. Potential uses of titanium dioxide in conjunction with ultrasound for improved disinfection. **Biochemical Engineering Journal**, 48: 416-423.

SIMONIĆ, M. Reverse Osmosis Treatment of Wastewater for Reuse as Process Water— A Case Study. **Membranes** 2021, 11, 976. <https://doi.org/10.3390/membranes11120976>

SINGH, K.; HACHEM-VERMETTE, C. Economical energy resource planning to promote sustainable urban design. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 137, p. 110619, 1 mar. 2021.

SOARES, J.C.A. **Estudo e aplicação do ensaio não destrutivo por ultrassom com a tecnologia *Phased Array***, Escola Superior de Tecnologia e Gestão, Instituto Politécnico de Bragança, Bragança, p. 1 - 195, novembro, 2018.

STENBERG, V.; RYDÉN, M.; LIND, F. Evaluation of bed-to-tube heat transfer in a fluidized bed heat exchanger in a 75 MWth CFB boiler for municipal solid waste fuels. **Fuel**, v. 339, p. 127375, 1 maio 2023.

STEFAN, A.; BALAN, G. 2011. The Chemistry of the Raw Water Treated By Air-Jet Ultrasound Generator. **Rev. Roum. Sci. Tech.Mec. Appl.**, 56(1): 85-92.

TORREIRA, Raul Peragallo. **Geradores de vapor**. 1.ed. São Paulo: Editora Libris, 1995.

TOURAB, A.E.; BLANCO-MARIGORTA, A.M.; ELHARIDI, A.M.; SUÁREZ-LÓPEZ, M.J. 2020. A Novel Humidification Technique Used in Water Desalination Systems Based on the Humidification–Dehumidification Process: Experimentally and Theoretically. *Water*, 12, 2264. <https://doi.org/10.3390/w12082264>.

TSAI, H.Y.; YU-JEN, L.; CHIU, K.C. Ultrasonic generator for the piezoelectric transducer in IoT 2020 *IEEE Eurasia Conference on IOT, Communication and Engineering (ECICE)*, 2020, pp. 164-167, doi: 10.1109/ECICE50847.2020.9302001.

VIKULINA, V.; VIKULIN, P. The effect of ultrasound on the process of water softening. *In: MATEC Web of Conferences* 251, 03003 (2018).

VIÑA, F. S.; KIPPER, L. M.; MORAES, J. A. R. CONTRIBUIÇÃO DOS PONTOS DE ENTREGA VOLUNTÁRIA COMO INSTRUMENTO PARA O FORTALECIMENTO DA GESTÃO MUNICIPAL E PRÁTICAS DE COLETA SELETIVA: uma análise bibliométrica. *Exacta*, n. 0, 6 jan. 2022.

VORONOV, Y.V.; PERVOV, A.G.; SOMOV, M.A. **Water and special water purification at the plant**. Moscow: AV, 2016.

VOURCH, Mickael; BALANNEC, Béatrice; BERNARD, Chaufer; GÉRARD, Dorange. Treatment of dairy industry wastewater by reverse osmosis for water reuse. *Desalination*, v. 219, p. 190 – 202, 2007

WEAR, K. A. Mechanisms for attenuation in cancellous-bone-mimicking phantoms, *IEEE Trans Ultrason Ferroelectr Freq Control*, 55(11), 2418–2425 (2008).

CAPÍTULO II

ARTIGO PUBLICADO NO PERIÓDICO ENERGIES
QUALIS A1 ENGENHARIA II - CAPES



Article

Use of High-Frequency Ultrasound Waves for Boiler Water Demineralization/Desalination Treatment

Yago Fraga Ferreira Brandão ¹, Leonardo Bandeira dos Santos ^{2,3}, Gleice Paula de Araújo ^{1,2}, Leonildo Pereira Pedrosa Júnior ^{1,2}, Benjamim Francisco da Costa Neto ⁴, Rita de Cássia Freire Soares da Silva ^{1,2}, Mohand Benachour ^{2,5}, Atilio Converti ⁶, Leonie Asfora Sarubbo ^{1,2,3,*} and Valdemir Alexandre dos Santos ^{1,2,3}

¹ UNICAP-ICAM TECH International School, Catholic University of Pernambuco (UNICAP), Rua do Príncipe n. 526, Boa Vista, Recife 50050-900, Brazil; yagoff@hotmail.com (Y.F.F.B.); gleeicearaujo@hotmail.com (G.P.d.A.); leopedrosajr2@gmail.com (L.P.P.J.); ritaf78@gmail.com (R.d.C.F.S.d.S.); valdemir.santos@unicap.br (V.A.d.S.)

² Advanced Institute of Technology and Innovation (IATI), Rua Potira 31, Prado, Recife 50751-310, Brazil; leonardo.bandeira@iati.org.br (L.B.d.S.); mbena@ufpe.br (M.B.)

³ Northeast Biotechnology Network, Federal Rural University of Pernambuco, Recife, Rua Manoel de Medeiros s/n, Dois Irmãos, Recife 52171-900, Brazil

⁴ TermoCabo S.A., Av. Refibras 146, Industrial District, Cabo de Santo Agostinho 54505-000, Brazil; costa@brasympe.com.br

⁵ Department of Chemical Engineering, Federal University of Pernambuco, Av. dos Economistas s/n, Recife 50740-590, Brazil

⁶ Department of Civil, Chemical and Environmental Engineering, Università degli Studi di Genova (UNIGE), Pole of Chemical Engineering, Via Opera Pia 15, I-16145 Genova, Italy; converti@unige.it

* Correspondence: leonie.sarubbo@unicap.br

Uso de Ultrassom de Alta Frequência para Tratamento
Desmineralização/Dessalinização de Água de Caldeira

Resumo: Vibrações ultrassônicas isoladas foram usadas para tratar a água de alimentação de uma caldeira de tubo de água produtora de vapor de 20 bar. Tratamentos físicos como ultrassonografias e osmose reversa (RO) são recomendados como os mais ecológicos para esse fim. Um novo protótipo em escala de bancada que fornece 6 L/h de água tratada foi projetado e construído. A atomização ultrassônica da água bruta com transdutores piezoelétricos de 1,7 MHz e subsequente umidificação e desumidificação do fluxo de ar de arrasto foi a sequência inovadora de operações utilizadas como técnica de tratamento. Para garantir maior capacidade de umidificação ao ar de arrasto, a energia disponível a partir da inércia térmica da coluna líquida (água bruta) na câmara de vaporização protótipo foi utilizada para aquecer este fluxo de ar. Após uma única passagem de água bruta através do protótipo em escala de bancada, obteve-se uma redução de 98,0% na condutividade e uma diminuição de 99,0% no teor de sólidos dissolvidos totais a uma temperatura de ar de arrasto de 70 °C. Em comparação com a RO, duas das principais vantagens do método de ondas ultrassônicas proposto são a eliminação do uso de agentes químicos na fase de pré-tratamento e uma redução significativa nos custos de intenção por substituição de membrana.

Palavras-chave: técnica ultrassônica; protótipo em escala de bancada; água fervente; atomização ultrassônica; inércia térmica

1. Introdução

Água usada em processos industriais pode ser contaminada por metais, material oleoso, substâncias orgânicas de processos e outras substâncias químicas. Entre as desvantagens apresentadas por esses tipos de água, danos ao meio ambiente, aumento do consumo de energia, inc pode-se destacar o custo de produção recauchutado e até mesmo os acidentes de trabalho [1]. Em geral, o conteúdo de sais dissolvidos na água é principalmente prejudicial para o equipamento com o qual entra em contato. Por exemplo, sais de cálcio e magnésio são extremamente prejudiciais a equipamentos devido ao seu elevado potencial de precipitação e incrustação em superfícies metálicas [2]. Diante da presença recorrente de tais contaminantes, o tratamento da água industrial é primordial. Dentre as tecnologias inovadoras que podem ser utilizadas para esse fim, além dos tratamentos tradicionais, destacam-se a adsorção, a purificação fotocatalítica, a oxidação avançada e a catálise por micro-ondas [3–5], todas elas com vantagens e desvantagens específicas dependendo dos poluentes e das aplicações.

Para atingir as características necessárias para uso em caldeiras e sistemas de cogeração, a água deve passar por um processo de desmineralização, que atualmente pode ser feito por meio de duas tecnologias: resinas de troca iônica e membranas de osmose reversa [6]. Se essas especificidades não forem atendidas, ambas as águas

podem causar problemas na linha de produção. A água industrial em condições inadequadas pode reduzir drasticamente os intervalos para a manutenção da caldeira, interrompendo a produção da planta e levando a um aumento no consumo de reagentes.

Os teores adequados de cálcio, magnésio e sílica na água de alimentação da caldeira podem ser alcançados pela ação de amaciadores de água, colunas de deionização e uma unidade de osmose reversa (RO) para dessalinização e redução dos níveis totais de sólidos dissolvidos. A técnica de RO pode garantir um alto grau de alta pureza dessas águas. No entanto, devido às desvantagens dos altos custos de instalação e operação, um teor mínimo de rejeitos de 30% em relação ao fluxo de água de alimentação e rigorosos requisitos de pureza da água bruta (para reduzir os danos às membranas), essa técnica não é aplicada regularmente nas indústrias [7]. Com o objetivo de proporcionar uma técnica de natureza física, que permita vantagens como a redução do consumo de agentes químicos e membranas, a técnica de ultrassom (US) aparece como uma opção entre os métodos de dessalinização. Com o objetivo de reduzir a quantidade de produtos químicos, um número crescente de técnicas de tratamento físico de água tem sido proposto, dentre as quais se destaca o uso da US [8,9]. Os EUA também têm sido bem-sucedidos na redução da formação de espuma nas etapas de produção, transporte e processamento de petróleo bruto [10].

Um processo ultrassônico típico é quando o transdutor opera em uma frequência entre 20 kHz e 600 kHz. Nesta faixa de frequência, microbolhas com um diâmetro médio de cerca de 150 μm são geradas, dando origem à energia de cavitação quando tais microbolhas colapsam [11]. Na parte baixa desta faixa de frequência (28 kHz), o tratamento de ultrassom a uma potência de 60 Watts permitiu uma remoção efetiva do total de sólidos dissolvidos, bem como uma redução de turbidez de 76%. Operando a 27,2 kHz por 30 s, a turbidez da água diminuiu 4 vezes [12].

Usando processos de ultrassom de alta frequência entre 600 kHz e 5 MHz, microbolhas menores são geradas e, quando elas colapsam, uma quantidade proporcionalmente menor de energia de cavitação é liberada [13]. De acordo com Leong et al. [13], na vaporização da água, obtida com o auxílio da energia de vibração de um emissor ultrassônico de frequência alta, as moléculas do líquido também vibram em uma frequência muito alta (cerca de 2 MHz). Durante a amplitude negativa do ciclo do transdutor, são criados vazios súbitos que causam a produção de microbolhas, que são empurradas para a superfície da água durante a amplitude positiva do ciclo. Este efeito é propriamente chamado de cavitação megassônica [14].

Entezari e Tahmasbi [15] usaram ondas ultrassônicas de 20 kHz combinadas com o processo de troca iônica para remover a dureza da água. Usando uma resina catiônica de copolímero de estireno-divinilbenzeno, eles estudaram o efeito de parâmetros como

tempo de contato, quantidade de sorvente, temperatura e concentração de íons. Hiratsuka e Pathak [16], usando irradiação ultrassônica de 28 kHz para suavizar seis tipos diferentes de água potável, não identificaram nenhuma melhoria da eficiência do tratamento com tempos de sonicação entre 10 e 30 min. Esses autores obtiveram diferentes reduções de dureza em diferentes valores de pH, ou seja, de 60 a 35 mg/L em pH 7,0–7,7; de 15 a 5 mg/L em pH 6,7–8,3; de 32 a 15 mg/L em pH 8,3–8,5; de 304 a 100 mg/L em pH 7,2–7,8; de 315 a 150 mg/L em pH 7,8–8,2; e de 1468 a 150 mg/L em pH 7,4–7,8.

Durante sua ocorrência, ondas ultrassônicas de alta frequência (HFSU) também podem ser usadas para modificar as propriedades físico-químicas da água. Essas ondas se propagam sob a superfície livre do líquido, fazendo com que pequenas gotículas de água evaporem. A técnica de umidificação ultrassônica e desumidificação atmosférica do ar (HDH) tem sido utilizada em um sistema híbrido para alterar o teor de sais contidos na água salobra [17,18]. A concentração de sais na água de alimentação de um sistema de dessalinização ultrassônica proposto por Hosseingholilou et al. [19], na faixa de 5000 a 15.000 mg/L, foi o fator que mais contribuiu para a eficiência da dessalinização. Para isso, um fluxo de ar quente foi criado pelos autores usando um ventilador e dois elementos térmicos ao longo de um canal de ar. Além desse canal de ar quente, o arranjo experimental consistiu em uma câmara de atomização ultrassônica para água salobra e uma câmara para mistura de ar quente com vapor salino, onde também houve a separação do excesso de água e da água responsável pela supersaturação do ar [20]. A jusante da câmara de separação, um condensador recuperou a água tratada, enquanto na base da câmara de separação, uma abertura permitiu a eliminação de rejeitos salinos.

Como exemplo do processo de dessalinização da água em estado supercrítico, de acordo com Odu et al. [21], o desenvolvimento de experimentos utilizando HFSU não deve se restringir apenas aos parâmetros responsáveis pelo HDH, uma vez que o estado de excitação em que a água evaporada é encontrada apresenta um comportamento semelhante, liberando mais facilmente sais dissolvidos no meio, além de outros efeitos físico-químicos de grande importância comercial. Até agora, vibrações ultrassônicas com uma frequência de 1,7 MHz têm sido usadas para a atomização de água bruta e a formação de uma espécie de névoa salina [22]. Os vapores dessa névoa se comportam como um estado pseudocrítico devido aos efeitos causados pelos intensos níveis de vibrações moleculares, e esses tipos de estados têm sido utilizados como técnica de dessalinização [23]. Assim, o transporte de água atomizada e sem sal devido às vibrações dos EUA pode ser recuperado com o auxílio da desumidificação do gás de arrasto (ar quente), apresentando-se como uma técnica opcional de dessalinização a ser testada.

2. Materiais e Métodos

2.1. Configuração Experimental

O protótipo em escala de bancada (Figura 1) consistiu em um tanque de atomização (1), uma bobina para a introdução e aquecimento do ar atmosférico (2), uma câmara de mistura (3), duas câmaras de condensação (4,5) e um duto para a descarga de ar (6). Um banco de transdutores (7) com cristais piezoelétricos foi instalado na base do tanque de atomização para gerar ondas de ultrassom (1,7 MHz). Um resfriador foi instalado na base do compartimento de vaporização ultrassônica (8) para ajudar a manter a temperatura da coluna de líquido em torno de 40 °C, conforme recomendado pelos fabricantes para que os transdutores funcionem corretamente. Outro resfriador (9) foi instalado acima das duas câmaras de condensação. Fluxos contínuos de água bruta (10) e ar atmosférico (11) alimentaram o protótipo durante os experimentos. O tanque de atomização, com tamanho de 11 × 16 × 16 cm de comprimento, largura e altura, respectivamente, foi equipado com duas aberturas para permitir a entrada de água salina e a retirada da salmoura após cada teste. Este protótipo foi feito de chapas de aço inoxidável AISI 314 de 1,5 mm de espessura.

A água bruta entrou no sistema no topo da câmara de atomização. Para atomizar a água, essa mudança de fase foi realizada com o auxílio do banco de transdutores ultrassônicos [24], composto por 6 pellets cerâmicos piezoelétricos, com cada transdutor tendo uma capacidade de vaporização de água de 0,3 kg/h. Uma bobina interna de cobre de 0,5 mm foi imersa na coluna de líquido acima do banco do transdutor. Essa estratégia foi utilizada para aquecer o ar atmosférico com o calor liberado pela água durante sua atomização, aumentando a capacidade de saturação da corrente de ar. O trecho final da bobina que estava acima da superfície livre da coluna de água foi endireitado e transportou o fluxo de ar quente para direcionar a névoa ultrassônica para as câmaras de condensação. Uma mistura composta por água atomizada e ar quente passou por três tipos de compartimentos. Primeiro, passou por uma pré-câmara contendo uma espécie de rampa, que deve contribuir para o retorno da água bruta devido ao seu possível arrasto por uma corrente de ar sob o efeito da formação de vórtices. Depois de passar pela pré-câmara, o ar úmido aquecido entrou na câmara de condensação 1, onde a maior parte da água transportada pela corrente de ar foi condensada. Na base desta câmara, uma válvula permitiu a remoção de amostras para análise de condensado. A maior parte da água atomizada restante condensou-se na câmara 2 e foi removida por uma válvula de amostragem instalada em sua base. Um duto foi instalado para separar o vapor e o ar do ultrassom através de uma placa de polímero instalada no topo deste duto. A espessura da pilha formada por placas poliméricas foi responsável, juntamente com o fluxo de ar quente, pela pressão do sistema. Dois resfriadores foram instalados nas câmaras de condensação para facilitar a coleta da água condensada formada pelo vapor de ultrassom.

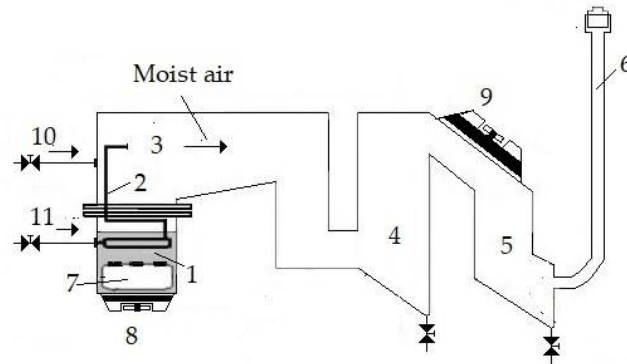


Figura 1. Diagrama esquemático do protótipo em escala de bancada usado para realizar testes de tratamento de água de caldeira com ondas de ultrassom de alta frequência: 1 - Tanque de atomização; 2 - Bobina de aquecimento de ar; 3 - Câmara de mistura; 4,5 - Câmaras de condensação; 6 - Duto para a descarga de ar; 7 - Banco de transdutores; 8,9 - Resfriadores; 10 - Entrada de água bruta; 11 - Entrada de ar atmosférico

A Figura 2 mostra o protótipo de bancada após a construção e instalação, juntamente com o isolamento térmico, montado em uma derrapagem adaptada para seus acessórios elétricos e eletrônicos.

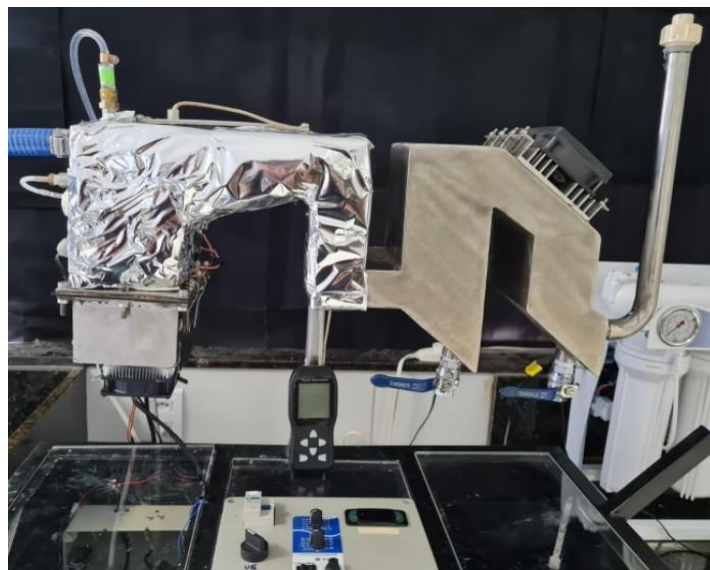


Figura 2. Protótipo em escala de bancada desenvolvido para tratamento ultrassônico de água de caldeira.

2.2. Análise das Condições Psicométricas

A adição de umidade ao ar sem variação em sua temperatura de bulbo seco é chamada de umidificação, enquanto a remoção de umidade sem variação dessa mesma temperatura é chamada de desumidificação. Na prática industrial, esses dois tipos de processos raramente são encontrados, e os processos de umidificação/desumidificação são geralmente acompanhados por aquecimento e resfriamento do ar, respectivamente [25]. Como pode ser visto na Figura 1, no ponto 11, o ar atmosférico encontra-se em condições psicométricas, ilustradas pelo gráfico psicrométrico delineado na Figura 3 [26,27]. Do ponto 11 ao ponto 3, ocorre um aumento de temperatura devido a uma troca de calor

através da bobina imersa na coluna de líquido. Na região em torno do ponto 3, o ar fica saturado devido à presença de vapor de água formado por atomização ultrassônica. Nas câmaras 4 e 5, a água contida na corrente de ar condensa-se e é recolhida como produto da desumidificação causada pela redução das temperaturas do bolbo seco e do bolbo húmido (5'). A partir do ponto 5, a corrente de ar é descarregada na atmosfera, passando pelo duto, que tem em sua extremidade superior um pellet de material polimérico que retém uma grande parte da água residual contida no ar.

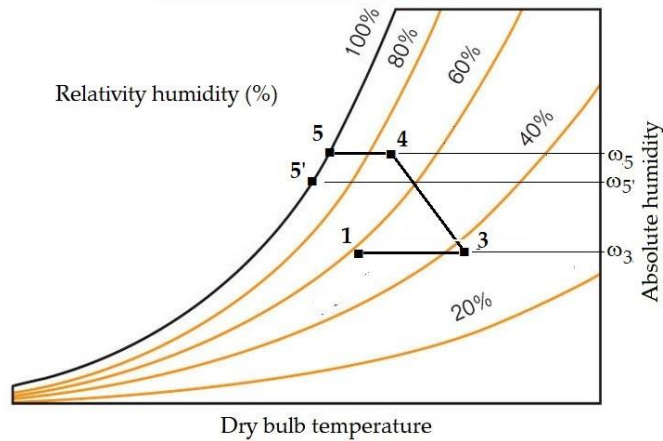


Figura 3. Esboço de um gráfico psicrométrico mostrando a umidade absoluta dos pontos correspondentes aos ilustrados na Figura 1.

Em condições de estado estacionário, a taxa de fluxo mássico de ar seco (\dot{m}_{ar}) que entra no protótipo de bancada deve ser igual à taxa de fluxo de massa de ar seco descarregado. Assim, de acordo com a Figura 3, a vazão mássica máxima da água atomizada [28] é igual à da água atomizada ultrassonicamente, \dot{m}_{wus} :

$$\dot{m}_{wus} = \dot{m}_{ar}(\omega_3 - \omega_2) \tag{1}$$

Em que:

- \dot{m}_{wus} — vazão mássica de água atomizada, kg de água/s;
- \dot{m}_{ar} — vazão mássica de entrada de ar seco, kg de ar/s secos;
- ω_2 — umidade absoluta no ponto 2, kg de água/kg de ar seco;
- ω_3 — umidade absoluta no ponto 3, kg de água/kg de ar seco.

Sabe-se que uma variação de temperatura pode ajudar a aumentar a quantidade de água a ser transportada pelo ar [29]. Sabe-se também que a vazão volumétrica do ar, q_{ar} , que contém a quantidade de ar seco necessária para extrair essa água vaporizada, pode ser estimada como:

$$q_{ar} = \dot{m}_{ar} \tag{2}$$

onde V_{ar} é o volume específico de ar (m^3/kg de ar seco). Assim, inserindo a Equação (1) na Equação (2) e utilizando a expressão do volume específico de ar proposto por Wilhelm [30], obtém-se a Equação (3):

$$q_{ar} = 0,2871(t + 273,15) \left(1 + 1,6078 \omega_3 \right) \frac{m_{wus}}{p(\omega_3 - \omega_2)} \quad (3)$$

Em que:

t — Temperatura do bolbo seco, °C;

p — Pressão total, kPa.

2.3. Balanços de massa e de energia

O balanço hídrico no protótipo ultrassônico (Figura 1) pode ser escrito da seguinte forma [31]:

$$\dot{m}_{ar2} \omega_2 + \dot{m}_{wus} = \dot{m}_{w4} + \dot{m}_{w5} + \dot{m}_{ar5} \omega_5 \quad (4)$$

onde:

\dot{m}_{ar2} — caudal mássico do ar seco no ponto 2, kg/s;

\dot{m}_{w4} — caudal mássico da água recolhida na câmara 4, kg de água/s;

\dot{m}_{w5} — caudal mássico da água recolhida na câmara 5, kg de água/s;

\dot{m}_{ar5} — caudal mássico do ar seco no ponto 5, kg de ar/s seco(s);

ω_5 — humidade absoluta no ponto 5, kg de água/kg de ar seco.

A eficiência de recuperação da água tratada por condensação (η_{cond}) no banco protótipo é:

$$\eta_{cond} = \frac{\dot{m}_{w4} + \dot{m}_{w5}}{\dot{m}_{wus}} \quad (5)$$

Com o fluxo mássico de ar seco foi o mesmo na entrada e saída do protótipo em escala de bancada, ou seja, $\dot{m}_{ar2} = \dot{m}_{ar5}$, a Equação (5) pode ser reescrita, com o auxílio da Equação (4), como:

$$\eta_{cond} = \frac{\dot{m}_{w4} + \dot{m}_{w5}}{\dot{m}_{w4} + \dot{m}_{w5} + \dot{m}_{ar2}(\omega_5 - \omega_2)} \quad (6)$$

Um balanço energético para o protótipo em escala de bancada, baseado na Equação (4), levando em consideração a inércia térmica da água remanescente na fase líquida na câmara de atomização considerada como um sistema adiabático, pode ser escrito da seguinte forma [31]:

$$\dot{m}_{ar2} h_{ar2} + \dot{m}_{wus} h_{wus} + \dot{m}_{wus} C_{pw}(T_w - T_{amb}) = \dot{m}_{w4} h_{w4} + \dot{m}_{w5} h_{w5} + \dot{m}_{ar5} h_{ar5} \quad (7)$$

Em que:

h_{ar2} — entalpia ar específico do ar húmido no ponto 2, kJ/kg;

h_{wus} — entalpia específica de água atomizada ultrassonicamente, kJ/kg;

C_{pw} — capacidade térmica específica da água na fase líquida na câmara de atomização, kJ/(kg· K);

T_w — temperatura da câmara de atomização, K;

T_{amb} — temperatura ambiente, K;

h_{w4} — entalpia específica de água condensada no ponto 4, kJ/kg;

h_{w5} — entalpia específica da água condensada no ponto 5, kJ/kg;

h_{ar5} — entalpia específica do ar úmido no ponto 5, kJ/kg.

Assim, para uma avaliação precisa do balanço energético no protótipo de tratamento ultrassônico de água, a entalpia específica da água atomizada foi estimada como:

$$h_{wus} = \frac{m'_{w4}h_{w4} + m'_{w5}h_{w5} + m'_{ar2}(h_{ar5} - h_{ar2}) - m'_{w}C_{pw}(T_w - T_{amb})}{m'_{wus}} \quad (8)$$

As especificações técnicas da instrumentação utilizada para os experimentos estão resumidas na Tabela:

Tabela 1. Especificações técnicas da instrumentação utilizada na configuração experimental.

Instrumento de Medição	Exatidão	Gama
Osciloscópio	±2%	10–300 MHz
Voltímetro	±0.5%	45–260 V
Wattímetro Digital	±0.7%	0,5–22.000 W
Termohigrômetro		
Temperatura	±0.5%	-20–70 °C
Umidade da relatividade	±1%	0–100%
Câmera Multi-Digital	±1.5 °C	-20 a 400 °C
Termopar E-Type	±1.7%	-270–870 °C

2.4. Análise de Componentes Principais (ACP)

A identificação de variáveis que podem efetivamente contribuir para o sucesso dos equipamentos também pode ser utilizada para definir os limites de determinadas condições de operação. Devido ao grande número de dimensões presentes na análise desse tipo de sistema, identificar as variáveis de processo que podem ter um grande impacto em seu desempenho torna-se uma tarefa complicada se não forem utilizadas ferramentas adequadas. Uma solução recomendada é o uso de técnicas estatísticas de análise multivariada, mais especificamente, a Análise de Componentes Principais (ACP) [32].

A ACP é um método de ordenação de variáveis, cujos resultados consistem na formação de novos eixos compostos pela combinação de variáveis descritoras e pela importância quanto à variabilidade e influência de cada uma delas sobre o fenômeno investigado. O método estabelece um conjunto de eixos (ou fatores) perpendiculares entre si, em que cada componente é um autovetor obtido a partir da matriz de correlação linear ou da matriz de covariância, dependendo das variáveis utilizadas. O comprimento do eixo é o autovalor dessa matriz, que corresponde ao grau de variação do fator no experimento. Ao determinar os autovetores e autovalores da matriz, obtém-se um sistema de coordenadas que fornece a similaridade das amostras e seu grau de variação no experimento. O primeiro fator (ou eixo) da ACP representa o fator com maior grau de variância nos dados. A interpretação de uma ACP consiste em definir o que cada eixo representa no sentido do fator. A interpretação torna-se cada vez mais difícil à medida que o seu autovalor diminui a sua quota de variância [33].

O uso da ACP facilita a identificação dos componentes que melhor poderiam representar o efeito dos fatores sobre a variabilidade do sistema em estudo. Este método permite reduzir a dimensionalidade da base de dados, mantendo o máximo possível da informação presente nos dados [34]. Geralmente, mais de 80% das informações presentes nas variáveis originais são obtidas em apenas dois ou três dos primeiros componentes principais, além de ajudar a julgar a importância das variáveis originais escolhidas. Em outras palavras, as variáveis com maior peso na combinação linear dos primeiros componentes principais são as mais importantes do ponto de vista estatístico, permitindo estabelecer correlações entre tais variáveis e entre elas e a variável ou conjunto de variáveis de resposta de interesse.

Como mostrado na Equação (9), um componente principal (Y_j) é obtido pela combinação linear dos valores de cada variável medida (X_j) [35]:

$$Y_j = a_{i1}X_{i1} + a_{i2}X_{i2} + \dots + a_{in}X_{in} \quad (9)$$

Multiplicado pelos coeficientes para o j -ésimo fator (a_{ij}), também chamado de cargas.

Ao criar escores para os componentes principais, as cargas de todas as variáveis originais são usadas, algumas das quais, no entanto, são maiores e outras próximas de zero. A solução encontrada para definir carregamentos válidos foi estabelecer um valor de corte. No entanto, se o componente principal for usado apenas para análise exploratória de dados, não importa se esses valores menores são ou não mantidos [35].

A escolha dos fatores relevantes para o estudo do sistema deve ser baseada nas condições de operação do sistema em estudo. Neste caso, os seguintes fatores foram

considerados importantes para o uso do sistema de tratamento ultrassônico: vazão de ar quente (X_1), L/h; condutividade da água bruta (X_2), $\mu\text{S}/\text{cm}$; temperatura do ar transportador (X_3), K; pressão no interior do protótipo (X_4), $\text{cm H}_2\text{O}$; e eficiência percentual de redução da condutividade da água bruta (X_5), %.

2.5. Escolha e Preparação de Dados

O primeiro passo na coleta de dados para a aplicação da ACP é estabelecer o número de amostras. Esse número deve ser pelo menos igual ao número de variáveis multiplicado pelo número mínimo de experimentos para se obter a média amostral da variável. Os dados são então normalizados através de suas médias e desvios padrão. A sequência de operações para padronização é: (a) cálculo da média dos valores brutos de cada parâmetro; b) Cálculo do desvio-padrão de cada parâmetro; e (c) cálculo do valor padronizado com base na Equação (10)

$$Xi = \frac{xi - \bar{x}}{s} \quad (10)$$

Em que:

Xi — Valor padronizado;

xi — Observação individual;

\bar{x} — Média aritmética;

s — Desvio padrão.

Ao final desse processo, obtêm-se valores padronizados com desvio padrão igual a um, para todas as variáveis, o que é necessário devido à natureza e amplitude das características estudadas. Graças à padronização, as variâncias dos parâmetros tornam-se comparáveis entre si, evitando que uma determinada característica se torne dominante devido à sua amplitude ou escala.

3. Resultados e Discussão

3.1. Perfil Térmico do Protótipo de Bancada

A Figura 4 mostra uma imagem termográfica do protótipo de tratamento ultrassônico, para a qual foi utilizada uma câmera digital FLIR C5 com um gerador de imagens térmicas precisas de 160×120 (19.200 pixels) (Multi-Spectral Dynamic Imaging,

MSX), luz visível de 5 megapixels e uma lanterna LED. Para a realização do registro termográfico, as superfícies externas do protótipo foram revestidas com material antirreflexo preto. Nesta figura, uma temperatura de 66,7 °C foi registrada como resultado da inércia térmica da coluna de líquido no compartimento de vaporização ultrassônica. Um valor máximo de 70 °C foi obtido para o ar de arrasto da névoa formado pela atomização ultrassônica da água bruta. Este valor foi apresentado como uma limitação da capacidade de aquecimento desta corrente de ar pela inércia térmica da coluna de água bruta na câmara de vaporização ultrassônica.

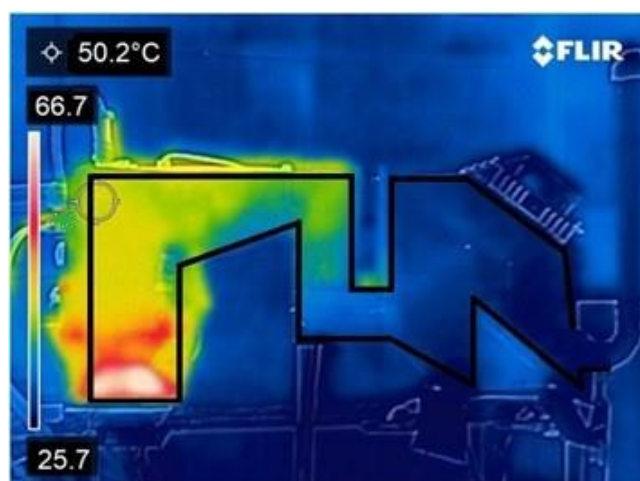


Figura 4. Perfil termográfico do protótipo ultrassônico em escala de bancada para tratamento de água de alimentação de caldeira.

3.2. Resultados da Análise de Componentes Principais

Após disposição na forma de tabela, os resultados da Análise de Componentes Principais (ACP) foram padronizados pela Equação (10) e listados na Tabela 2.

Tabela 2. Resumo dos resultados padronizados da Análise de Componentes Principais aplicados aos experimentos realizados no protótipo em escala de bancada para tratamento de ultrassom de água de caldeira.

Correr	X_1 (L/h)	X_2 (μ S/cm)	X_3 (K)	X_4 (cm H ₂ O)	X_5 (%)
1	0.000	-0,467	-0,471	-0,438	-0,336
2	2.000	-0,467	-0,471	-0,438	-1,497
3	-2.000	-0,467	-0,471	-0,438	-1,265
4	0.000	0.884	-0,471	-0,438	0.361
5	0.000	2.386	-0,471	-0,438	1.755
6	0.000	-0,467	0.943	-0,438	-0,103
7	0.000	-0,467	2.357	-0,438	0.826
8	0.000	-0,467	-0,471	0.548	-0,103
9	0.000	-0,467	-0,471	2.521	0.361

Os dados da Tabela 2 foram então transferidos para o software Statistic, e as análises de intercorrelação apropriadas das variáveis originais foram realizadas.

3.2.1. Autovalor

Em um PCA, o autovalor mede a porcentagem de variância explicada por cada componente principal. A Tabela 3 registra, para cada componente principal, os respectivos autovalores, a porcentagem de variância explicada, os autovalores cumulativos e a porcentagem cumulativa de variância explicada. Esses dados foram utilizados para selecionar o número de componentes principais responsáveis por capturar a maior parte da variação dos dados. Nesta análise, o número mínimo de componentes principais necessários foi três, sendo responsável por explicar nada menos que 86,84% da variância das quatro variáveis originais.

Tabela 3. Autovalores, porcentagem da variância explicada, autovalores cumulativos e porcentagem cumulativa da variância explicada (%) dos componentes principais.

Principal Componente	Valor próprio	Variância Total (%)	Cumulativo Valor próprio	Cumulativo Variância Total (%)
1	1.247791	31.19477	1.247791	31.1948
2	1.226021	30.65052	2.473812	61.8453
3	1.000000	25.00000	3.473812	86.8453
4	0.526188	13.15471	4.000000	100.0000

3.2.2. Gráfico de Gráfico de Scree

Os dados listados na Tabela 3 foram utilizados para a criação de um gráfico de gráfico de scree (Figura 5), onde a porcentagem de variância explicada dos componentes principais é ilustrada em ordem decrescente. Uma redução abrupta da inclinação é normalmente esperada como critério para reter ou excluir uma série de componentes principais. Neste caso, o critério de autovalor igual ou superior ao valor médio um foi suficiente para reter os três primeiros componentes principais.

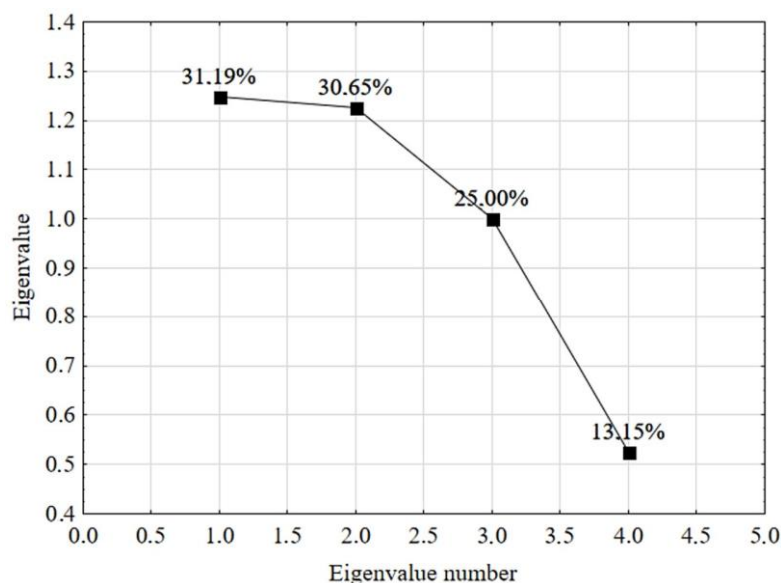


Figura 5. Gráfico de scree da porcentagem de variância explicada dos principais componentes para a eficiência do tratamento de ultrassom de água utilizando o protótipo em escala de bancada.

3.2.3. Importância Estatística das Variáveis

Os autovetores representam os componentes principais e resultam da atribuição de coeficientes a cada uma das variáveis originais (carregamentos). Tais cargas podem ser consideradas como uma medida relativa da importância de cada variável em relação aos componentes principais, e os sinais, positivos ou negativos, das cargas indicam direta ou inversamente relações proporcionais. A Tabela 4 resume as cargas correspondentes aos autovalores retidos neste PCA aplicados ao protótipo em escala de bancada utilizado neste trabalho.

Tabela 4. Coeficientes de carga característicos para os três primeiros componentes principais.

	PC1	PC2	PC3
X_1	0.000000	0.000000	1.000000
X_2	-0,763880	0.488767	0.000000
X_3	0.813313	0.399881	0.000000
X_4	-0,052919	-0,909518	0.000000

O primeiro componente principal (PC 1) foi uma nova variável, Y_1 , cujo valor para cada observação foi dado pela equação [35]:

$$Y_1 = -0,763880X_2 + 0,813313X_3 - 0,052919X_4 \quad (11)$$

o que explicou 31,19% da variância total dos dados. Além disso, esse primeiro autovalor que foi determinado correspondeu à maior porcentagem de variabilidade total presente, e assim por diante com os demais. Este primeiro componente importante reteve contribuições da condutividade da água bruta (X_2) e da temperatura do ar transportador (X_3). Essas variáveis apresentaram cargas acima de 0,7 e foram praticamente responsáveis pela forma como essa nova variável apresentou a variância total com maior valor. No caso de X_2 , a carga apresentou sinal negativo, ou seja, proporcionalidade inversa a essa nova variável. Uma alta concentração de sal na água bruta leva a uma alta concentração desses sais na água tratada. Observou-se um carregamento com sinal positivo para a temperatura do ar transportador (X_3), indicando uma proporcionalidade direta. Variações positivas de temperatura foram responsáveis por uma capacidade considerável do ar transportador de reter vapor ultrassônico, resultando em uma maior quantidade de água tratada.

Os comportamentos observados para as variáveis X_2 e X_3 concordaram com as observações de Hosseingholilou et al. [19].

Na combinação linear que deu origem ao PC2 (Y_2), obtivemos:

$$Y_2 = 0,488767X_2 + 0,399881X_3 - 0,909518X_4 \quad (12)$$

Nesse componente principal, que explicou 30,65% da variação total dos dados, observou-se que a pressão interna do protótipo (X_4) foi responsável pela maior parte dessa contribuição. O sinal negativo da carga X_4 pode ser explicado pela crescente dificuldade de vaporização ultra-sônica de água bruta com aumento da pressão. Apesar do alto valor absoluto dessa carga, sua presença no segundo componente principal reduziu sua importância na explicação do fenômeno em relação às variáveis X_2 e X_3 , que foram as dominantes em Y_1 .

O componente principal 3 (PC3), ou Y_3 , que explicou 25,0% da variação dos dados, teve apenas a vazão de ar da transportadora (X_1) como constituinte:

$$Y_3 = 1,000000X_1 \quad (13)$$

No entanto, essa variável original pareceu ser dependente das demais, uma vez que, para contribuir para o aumento da eficiência do tratamento da água de alimentação, esse efeito depende de sua própria temperatura, da concentração de impurezas na água e da pressão ambiente.

3.2.4. Gráficos de Hiper esfera e Carregamento de Variáveis

As variáveis X_2 e X_3 foram as variáveis mais importantes para a PC1, como pode ser observado na Figura 6 pelas projeções das cargas no eixo PC1, em comparação com as demais variáveis. Quanto maior a contribuição de uma variável, maior a projeção. Pode-se observar também que tais variáveis têm efeitos diferentes dependendo da abertura do ângulo entre elas. Os signos atribuídos aos semieixos de suas projeções também demonstram essas características. Quanto à eficiência do tratamento (X_5), X_2 tem o mesmo sinal e, portanto, é diretamente proporcional a ele, enquanto o oposto ocorre para X_3 . Ao observar as projeções das cargas variáveis no PC2, o protótipo de pressão interna (X_4), com sinal negativo, apresenta a maior projeção em relação aos demais.

A Figura 7 permite uma análise muito simples entre PC1 e PC3, sendo este último totalmente representado pela carga do fluxo de ar da transportadora (X_1). Em relação à variável X_5 , a variável X_1 apresenta proporcionalidade inversa.

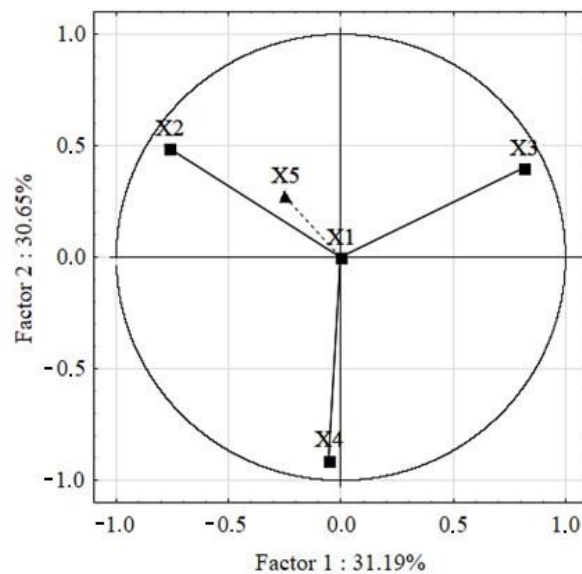


Figura 6. Gráfico biplot com projeções das cargas dos principais componentes PC1 e PC2.

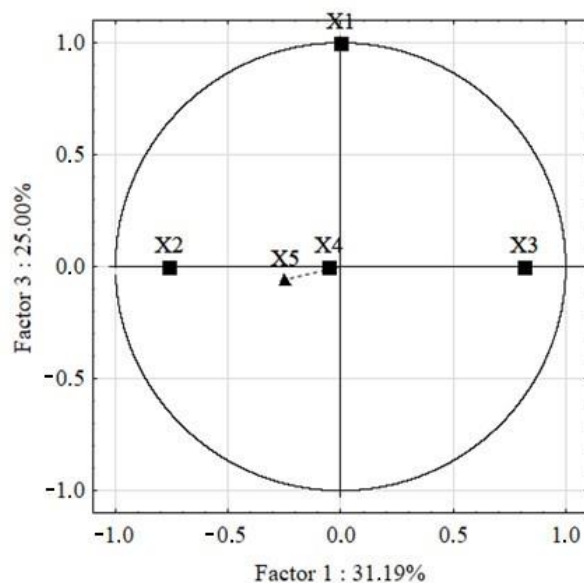


Figura 7. Gráfico biplot com projeções das cargas dos principais componentes PC1 e PC3.

3.3. Ensaio com Águas de Alimentação com Diferentes Salinidades

O uso de água tratada por operadores de instalações de caldeiras industriais tem sido recorrente. No entanto, tais instalações precisam estar preparadas para imprevistos e o uso de água com salinidade acima de 500 mg/L. Coletas de água moderadamente salobra com salinidade de até 20.000 mg/L foram realizadas, e ajustes de salinidade (5000, 10.000, 15.000 e 20.000 mg/L) foram realizados para a realização de experimentos com o protótipo ultrassônico em escala de bancada. A Figura 8 ilustra os resultados obtidos para reduções na condutividade da água de alimentação em diferentes temperaturas do ar misturado com o vapor ultrassônico, mantendo uma taxa de fluxo de massa de vapor ultrassônico de 3 kg/h e uma taxa de fluxo de massa de ar de 25 kg/h, ou uma razão entre as taxas de fluxo de massa de água e ar na ordem de 0,0045 [17].

Para baixos valores de salinidade, um aumento na temperatura provoca um aumento na retenção de umidade pelo ar e, conseqüentemente, um aumento na eficiência na redução da condutividade. Posteriormente, um aumento na salinidade da água de alimentação é refletido em um aumento na salinidade residual da água tratada, de acordo com as observações retiradas dos resultados da ACP. Portanto, o comportamento da redução percentual na condutividade da água tratada (condensada) mostrou uma ligeira redução à medida que a concentração de sal na água de alimentação aumentava. Para confirmar essas observações, foi feito um gráfico da redução percentual do total de sólidos dissolvidos (Figura 9), cujo comportamento, conforme previsto, seguiu o que foi observado para a redução percentual da condutividade.

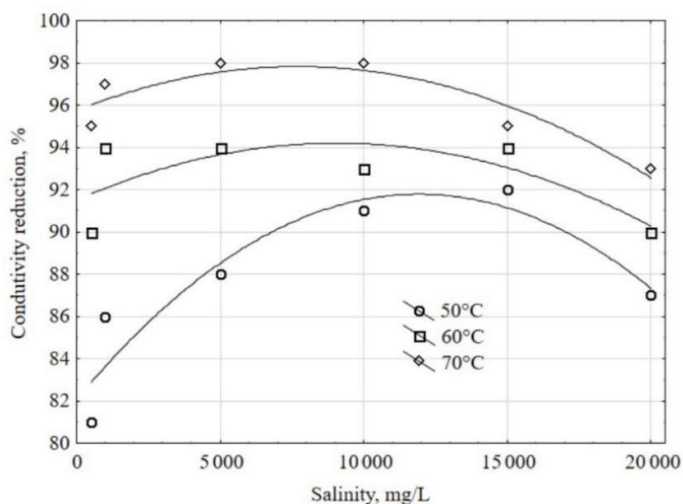


Figura 8. Redução percentual na condutividade da água tratada em função da salinidade da água de alimentação do protótipo ultrassônico em escala de bancada para tratamento de água de caldeira.

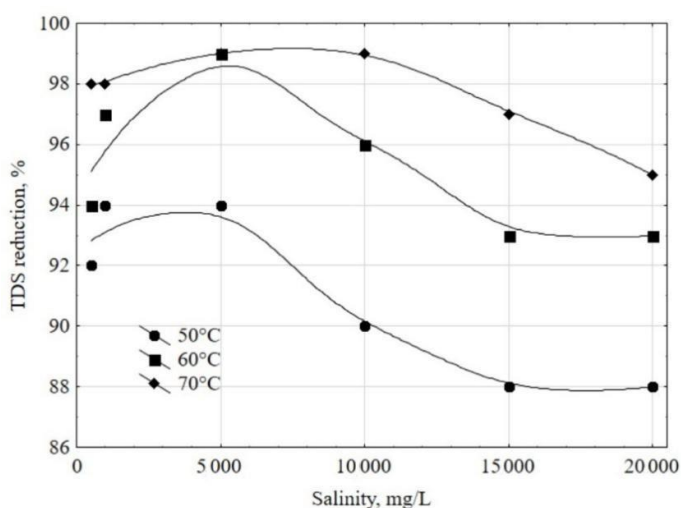


Figura 9. Redução percentual de sólidos dissolvidos totais (TDS) em água tratada em função da salinidade da água de alimentação do protótipo ultrassônico em escala de bancada para tratamento de água de caldeira.

A vaporização da água é um processo no qual moléculas de alta energia se encontram na superfície livre da coluna líquida e são facilmente transportadas para a fase de vapor [38]. Nesta mudança de fase, uma quantidade considerável de calor é perdida para a parte não vaporizada [39,40]. O tempo de aquecimento da faixa inferior da coluna de água apresenta um atraso considerável no aumento da temperatura devido à sua alta inércia térmica. Por outro lado, a velocidade de vaporização na superfície tem uma pequena inércia térmica e responde muito rapidamente a variação de temperatura, culminando em uma redução considerável no consumo de energia para a produção de vapor. No caso da vaporização ultrassônica, causada por ondas de alta frequência [41] na câmara de vaporização ultrassônica do protótipo em escala de bancada, o leito líquido foi aquecido e, devido a essa grande inércia térmica, uma quantidade considerável de calor foi deixada neste leito.

Assim, a energia retida pela câmara de vaporização ultra-sônica foi usada para aquecer o ar transportador.

Na avaliação do desempenho do protótipo ultrassônico para tratamento de água de caldeira por unidade de energia consumida, utilizou-se a produtividade específica, ou seja, a quantidade de água tratada produzida por unidade de energia. Os cálculos utilizados para a realização da Figura 10 levaram em consideração a entalpia específica da água vaporizada ultrassonicamente (336,92 kJ/kg) estimada pela Equação (8). Esse valor foi 16,5% maior que a entalpia de água no estado líquido saturado a 303 K. A produtividade específica foi superior às obtidas por Tourab et al. [17] e Hosseingholiliou et al. [19]. Tal discrepância pode ser justificada pelo uso de energia disponibilizada pela inércia térmica da câmara de vaporização e pelo uso de um sistema de refrigeração mais simples e econômico.

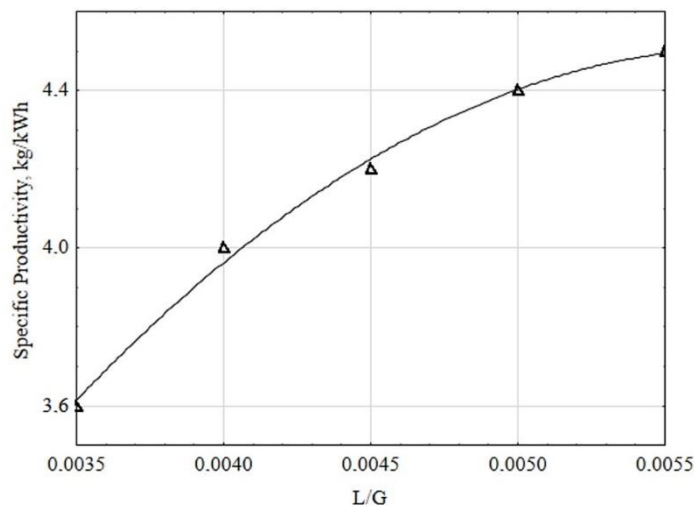


Figura 10. Produtividade específica em função da taxa de fluxo mássico de líquido (L) e gás (G).

Após a confirmação das respostas do protótipo em escala de bancada para água de diferentes salinidades, foram realizados experimentos para verificar as condições de conformidade com as especificações de análise da caldeira TERMOCABO (Tabela 5):

- Vazão mássica de ar: 25 kg/h;
- Temperatura do ar no ponto de mistura com água atomizada: 70 °C;
- Condutividade da água de alimentação: 5000 $\mu\text{S}/\text{cm}$;
- Pressão no interior do protótipo: 18 cm H_2O .

Tabela 5. Valores de parâmetros físico-químicos para água e água tratada antes e depois de uma única passagem pela câmara de irradiação do protótipo em escala de bancada.**Valor Recomendado para Resultados Experimentais**

Parâmetro de Controle	à Faixa de Pressão de 10–20 kgf/cm ²	Água Bruta	Água Tratada
pH	10.5–11.5	8,49 ± 0,05	7,75 ± 0,01
Condutividade (µS/cm)	<4000	616 ± 6	59,60 ± 0,04
Alcalinidade (mg/L CaCO ₃)	<800	80 ± 1	15,00 ± 0,01
Alcalinidade como NaOH (mg/L CaCO ₃)	150–350	-	-
Cloreto (mg/L Cl)	<400	130 ± 2	15,00 ± 0,01
Dureza total (mg/L CaCO ₃)	<2,0	135 ± 2	1,00 ± 0,01
Ferro total (mg/L Fe)	<5,0	-	-
Fosfato (mg/L PO ₄ ³⁻)	30–50	6,21 ± 0,01	1,61 ± 0,01
Sulfato (mg/L SO ₄ ²⁻)	30–50	5,00 ± 0,01	10,00 ± 0,01
Sílica (mg/L Si)	<150	-	-
Total de sólidos dissolvidos (mg/L)	<300	273 ± 3	35,28 ± 0,02

4. Conclusões

A novidade deste estudo foi o desenvolvimento de um protótipo em escala de bancada de um sistema de tratamento de água de caldeira equipado com atomização de água por vibrações ultrassônicas (US) capazes de operar a pressões logo acima da atmosférica e uma temperatura máxima de 70 °C, o que permitiria o uso de material de baixo custo em caso de expansão. Essa temperatura máxima foi apresentada como uma limitação da capacidade de aquecimento do ar transportador, utilizando apenas a inércia térmica do processo proposto. Utilizando a ferramenta estatística multivariada Análise de Componentes Principais, a análise das contribuições das variáveis relevantes para o processo de dessalinização tornou-se mais produtiva, rápida, objetiva e eficiente. Os resultados sugerem que a técnica norte-americana pode ser uma opção interessante para a dessalinização da água. Suas principais vantagens em relação à osmose reversa são: volume muito baixo de rejeitos (cerca de 2% por passagem), a falta de uma etapa de pré-tratamento de água bruta e o uso de energia fornecida pela inércia térmica armazenada na fase líquida durante a etapa de atomização acústica, aumentando assim a produtividade do processo de dessalinização. Estudos futuros são necessários para confirmar um número economicamente viável de estágios para diferentes faixas de salinidade da água bruta na alimentação de caldeiras para diferentes capacidades de produção de vapor.

Financiamento: Este estudo foi financiado pelo Programa de Pesquisa e Desenvolvimento da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL-PD-2901-0002/2019) e pela Termoelétrica TERMOCABO, pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES - Código de Finanças 001).

Declaração do Comitê de Revisão Institucional: Não aplicável.

Declaração de Consentimento Informado: Não aplicável.

Declaração de Disponibilidade de Dados: Os dados apresentados neste estudo estão disponíveis mediante solicitação do autor correspondente. Os dados não estão disponíveis publicamente devido à privacidade.

Agradecimentos: Os autores agradecem aos laboratórios da UNICAP Icam Tech School da Universidade Católica de Pernambuco (UNICAP), Rede Nordeste de Biotecnologia (RENORBIO) e Instituto Avançado de Tecnologia e Inovação (IATI), Brasil.

Conflitos de Interesse: Os autores declaram que a pesquisa foi conduzida na ausência de quaisquer relações comerciais ou financeiras que possam constituir um potencial conflito de interesses.

Referências

1. Larsen, M.A.D.; Petrovic, S.; Engström, R.E.; Drews, M.; Liersch, M.; Karlsson, K.B.; Howells, M. Desafios da disponibilidade de dados: Analisando o nexa água-energia na geração de eletricidade. *Estratégia Energética Rev.* **2019**, *26*, 100426. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2019.100426>.
2. Martínez Moya, S.; Boluda Botella, N. Revisão de técnicas para reduzir e prevenir a escala de carbonato. Prospecção em tratamento de água por magnetismo e eletromagnetismo. *Água* **2021**, *13*, 2365. <https://doi.org/10.3390/w13172365>.
3. Zhu, Z.; Rao, R.; Zhao, Z.; Oliveira, J.; Jiang, W.; Bi, F.; Yang, Y.; Zhang, X. Progresso da pesquisa sobre a remoção de poluentes ftalatos do meio ambiente. *J. Mol.* **2022**, *355*, 118930. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2022.118930>.
4. Gongo, Y.; Wang, Y.; Oliveira, N.; Wang, R.; Wang, M.; Zhang, X. Materiais à base de ferro para remoção simultânea de metais pesados (loid) e contaminantes orgânicos emergentes do ambiente aquático: avanços e perspectivas recentes. *Environ. Poluidor.* **2022**, *299*, 118871. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.118871>.
5. Li, X.; Oliveira, B.; Oliveira, X.; Deng, Z.; Oliveira, J.; Yang, Y.; Zhang, X. Aplicação de tecnologia avançada de oxidação baseada em radicais de sulfato na degradação de contaminantes orgânicos vestigiais (TrOCs): Avanços e perspectivas recentes. *J. Ambiente. Manag.* **2022**, *308*, 114664. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114664>.
6. Čuda, P.; Pospíšil, P.; Tenglerová, J. Osmose reversa no tratamento de água para caldeiras. *Dessalinização* **2006**, *198*, 41–46. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2006.09.007>.
7. Asadi, N.; Soleimanimehr, H.; Alinia-ziazi, A. Investigação sobre o tratamento de água de alimentação de caldeiras utilizando osmose reversa e troca iônica pelo software WAVE. *J. Appl. Res. Águas residuais de água* **2021**, *8*, 124–128. <https://doi.org/10.22126/ARWW.2022.7115.1231>.

8. Fetyan, N.A.H.; Attia, T.M.S. Purificação de água usando ondas de ultrassom: Aplicação e desafios. *Árabe. J. Basic Appl. Sci.* **2020**, *27*, 194–207. <https://doi.org/10.1080/25765299.2020.1762294>.
9. Chong, M.N.; Oliveira, B.; Chow, C.W.K.; Santo, C. Desenvolvimentos recentes na tecnologia de tratamento fotocatalítico de água: uma revisão. *Água Res.* **2010**, *p. 44*, 2997–3027. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2010.02.039>.
10. Wang, Z.H.; Liu, X.-Y.; Zhang, H.-Q.; Wang, Y.; Xu, Y.-F.; Peng, B.-L.; Liu, Y. Modelagem de características cinéticas do decaimento foa ms reforçado com polímero alcalinosurfactantesob onda estacionária ultra-sônica. *Animais de estimação.* **2022**, *no prelo*. <https://doi.org/10.1016/j.petsci.2022.04.012>.
11. Huggi, M.; Mise, S.R. Modelo de ANN otimizado para o processo de tratamento de águas residuais por ultrasonicação. *Int. J. Adv. Res. Eng. Technol.* **2019**, *10*, 94–102.
12. Stefan, A.; Balan, G. A química da água bruta tratada pelo gerador de ultrassom a jato de ar. *Rom. J. Tech. Sci., Appl. Mech.* **2011**, *p. 56*, 85–92.
13. Leong, T.; Juliano, P.; Knoerzer, K. Avanços no processamento ultra-sônico e megassônico de alimentos. *Alimentos Eng. Rev.* **2017**, *9*, 237–256. <https://doi.org/10.1007/s12393-017-9167-5>.
14. Chu, C.-L.; Lu, T.-Y.; Fuh, Y.-K. A adequação da limpeza ultra-sônica e megassônica de padrões em nanoescala em soluções de hidróxido de amônia para remoção de partículas e danos de características. *Semicond. Technol.* **2020**, *35*, 45001. <https://doi.org/10.1088/1361-6641/ab675d>.
15. Entezari, M.H.; Tahmasbi, M. Amolecimento da água por combinação de ultrassom e troca iônica. *Ultrasson. Sonochem.* **2009**, *16*, 356–360. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2008.09.008>.
16. Hiratsuka, A.; Pathak, D. Aplicação de ondas ultra-sônicas para a melhoria do tratamento de água. *J. Recursos de Água.* **2013**, *5*, 604–610. <https://doi.org/10.4236/jwarp.2013.56061>.
17. Tourab, A.E.; Blanco-Marigorta, A.M.; Elharidi, A.M.; Suárez-López, M.J. Uma nova técnica de umidificação usada em sistemas de dessalinização de água com base no processo de umidificação-desumidificação: Experimentalmente e teoricamente. *Água* **2020**, *12*, 2264. <https://doi.org/10.3390/w12082264>.
18. El-Maghlany, W.M.; Tourab, A.E.; Hegazy, A.H.; Teamah, M.A.; Hanafy, A.A. Estudo experimental sobre a intensificação da produtividade da unidade de dessalinização HDH utilizando desumidificação em dois estágios. *Dessalin. Tratamento de Água.* **2018**, *107*, 28–40. <https://doi.org/10.5004/dwt.2018.22119>.

19. Hosseingholilou, B.; Banakar, A.; Mostafaei, M. Projeto e avaliação de um novo sistema de dessalinização ultrassônica por metodologia de superfície de resposta. *Dessalin. Tratamento de Água*. **2019**, 164, 263–275. <https://doi.org/10.5004/dwt.2019.24458>.
20. Niam, A.G.; Suchahyo, L. Aplicação de atomizador ultra-sônico para câmaras aeropônicas de baixo custo (LCAC): Uma revisão. *IOP Conf. Ser. Terra Ambiente*. **2020**, 542, 12034. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/542/1/012034>.
21. Odu, S.O.; Van Der Ham, A. G.J.; Metz, S.; Kersten, S.R.A. Projeto de um processo para dessalinização supercrítica de água com descarga líquida zero. *Ind. Eng. Chem*. **2015**, 54, 5527–5535. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.5b00826>.
22. Choong, W.H.; Nasip, M.N.B. Estudo de caracterização de desempenho do sistema de atomizador ultrassônico para o desenvolvimento de sistemas de purificação de água. *Technol Sci*. **2021**, 8, 239–244.
23. Van Wyk, S.; van der Ham, A.G.J.; Kersten, S.R.A. Potencial de dessalinização supercrítica da água (SCWD) como descarga líquida zero (ZLD) tecnologia. *Dessalinização* **2020**, 495, 114593. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2020.114593>.
24. Abdelaziz, G.B.; El-Said, E.M.S.; Dahab, M.A.; Omara, M.A.; Sharshir, S.W. Revisão de sistemas híbridos de dessalinização solar. *Fontes de Energia Uma Recuperação Util. Ambiente*. **2021**, pp. 1–31. <https://doi.org/10.1080/15567036.2021.2005721>.
25. Giwa, A.; Oliveira, N.; Al Housani, A.; Haris, S.; Hasan, S.W. Avanços recentes nos processos de dessalinização por umidificação (HDH): Projetos e produtividade aprimorados. *Renovar. Sustentar. Energia Rev*. **2016**, 57, 929–944. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.108>.
26. Beltrán-Prieto, J.C.; Beltrán-Prieto, L.A. Estimativa de parâmetros psicométricos de misturas de vapor de água no ar. *Eng. Educ*. **2016**, 24, 39–43. <https://doi.org/10.1002/cae.21670>.
27. Devres, Y.O. Propriedades psicométricas do ar úmido: Procedimentos de cálculo. *Appl. Energia*. **1994**, p. 48, pp. 1–18. [https://doi.org/10.1016/0306-2619\(94\)90063-9](https://doi.org/10.1016/0306-2619(94)90063-9).
28. Garg, K.; Das, S.K.; Tyagi, H. Projeto térmico de um ciclo de dessalinização de umidificação-desumidificação consisting de umidificador de leito embalado e desumidificador de tubo aletado. *Int. J. Massa de calor Transf*. **2022**, 183, 122153. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.122153>.
29. Kabeel, A.E.; Hamed, M.H.; Omara, Z.M.; Sharshir, S.W. Dessalinização de água usando uma técnica de umidificação-desumidificação — Uma revisão detalhada. *Nat. Resour*. **2013**, 4, 286–305. <https://doi.org/10.4236/nr.2013.43036>.
30. Wilhelm, L.R. Cálculo numérico de propriedades cromométricas psi em unidades SI. *ASAE* **1976**, 19, 318–321. <https://doi.org/10.13031/2013.36019>.

31. Chen, P.; Akhtar, F.H.; Oliveira, M.; Kumja, M.; Ng, K.C. Um novo sistema de dessalinização de descarga de líquido zero baseado no processo de umidificação-desumidificação: Um estudo preliminar. *Água Res.* **2021**, *207*, 117794. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117794>.
32. Groenewald, J.W.D.; Nelson, L.R.; Hundermark, R.J.; Fago, K.; Sakaran, R.L.; van Rooyen, Q.; Cizek, A. Monitoramento da integridade do forno usando análise component principal: Um estudo de caso industrial. *J. S. Afr. Inst.* **2018**, *118*, 345–352. <https://doi.org/10.17159/2411-9717/2018/v118n4a3>.
33. Teng, S.Y.; Como, B.S.; Leong, W.D.; Teóis, J.H.; Siang Cheah, A.C.; Motavasel, Z.; Lam, H.L. Otimização de processos estatísticos auxiliados por análise de componentes principais (PASPO) para melhoria de processos em refinarias industriais. *J. Limpo. Prod.* **2019**, *225*, 359–375. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.272>.
34. Jolliffe, T.I.; Cadima, J. Análise de componentes principais: A review e desenvolvimentos recentes. *Phil. Trans. R. Soc. A* **2016**, *374*, 20150202. <http://dx.doi.org/10.1098/rsta.2015.0202>.
35. Ribeiro, R.; Smilde, A.K. Análise de componentes principais. *Métodos Anais 2014*, *6*, 2812–2831. <https://doi.org/10.1039/c3ay41907j>.
36. Husson, F.; Lê, S.; Pagès, J. *Análise Multivariada Exploratória por Exemplo Usando R*, 2ª ed.; Chapman; Hall/CRC: Boca Raton, FL, EUA, 2017. Disponível online: <http://factominer.free.fr/bookV2/index.html> (acessado em 17 de julho de 2021).
37. Kaiser, H.F. A aplicação de computers eletrônicos à análise fatorial. *Educ. Psychol. Meas.* **1960**, *20*, 141–151. <https://doi.org/10.1177/001316446002000116>.
38. Ahmadvand, S.; Abássio, B.; Azarfar, B.; Elhashimi, M.; Zhang, X.; Abbasi, B. Olhando além da eficiência energética: Uma revisão aplicada das tecnologias de desalinação de água e uma introdução à dessalinização capilar. *Água* **2019**, *11*, 696. <https://doi.org/10.3390/w11040696>.
39. Yang, Z.; Lian, Z.; Tao, R.; Zhong, H.K. Estudo experimental sobre o desempenho do sistema de regeneração dessecante líquido de íons atomizat aquecido internamente. *Appl. Therm. Eng.* **2019**, *163*, 114211. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114211>.
40. Kashyap, V.; Al-Bayati, A.; Sajadi, S.M.; Irajizad, P.; Wang, S.H.; Ghasemi, H. Um filme de grafite antientupimento flexível para dessalinização solar escalável por localização de calor. *J. Mater. A* **2017**, *5*, 15227–15234. <https://doi.org/10.1039/C7TA03977H>.
41. Zhang, X.; Oliveira, W.; Jiang, H.; Chen, Y.; Oliveira, T.; Jiang, H.; Hu, X. Dessalinização de calor de baixa qualidade impulsionada por capilares. *Dessalinização* **2017**, *410*, 10–18. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.01.034>.

42. RONCHI, Renata Peterle; SÃO MATEUS, E. S. **Avaliação da eficiência do ultrassom no processo de separação de fases em água produzida e em emulsões sintéticas do tipo O/A**. 2014. Tese de Doutorado. Dissertação de Mestrado. Departamento de Energia, Universidade Federal do Espírito Santo, São Mateus.

CAPÍTULO III

CAPÍTULO DE LIVRO ENVIADO PARA PUBLICAÇÃO PELA SEVEN
EDITORIA – QUALIS L1 CAPES

ÁREA DE MEIO AMBIENTE

ANÁLISE ECONÔMICA E AMBIENTAL DE UM SISTEMA ULTRASSÔNICO DE TRATAMENTO DE ÁGUA DE CALDEIRA

Leonildo Pereira Pedrosa Júnior, Leonardo Bandeira dos Santos, Benjamim Francisco da Costa Neto, Mohand Benachour, Valdemir Alexandre dos Santos

Resumo - A análise de custo-benefício é um dos instrumentos econômicos mais amplamente aceitos, pois é uma ferramenta racional e sistemática de apoio à tomada de decisão. Além disso, um processo de tratamento de águas deve ter significativos benefícios ambientais associados. Neste trabalho, foi desenvolvida uma análise de viabilidade técnica econômica e ambiental (EVTEA) de um sistema ultrassônico (US) de tratamento de água para alimentação de caldeiras (STUAC). O estudo baseou-se na instalação de um sistema de tratamento/dessalinização de água de caldeira por meio de um sistema de Osmose Reversa, já existente na planta de uma usina termelétrica, para simular os benefícios de um protótipo piloto de 500 L/h de um STUAC. Além de ser considerado uma técnica de Engenharia Verde, os benefícios do US foram considerados na elaboração do fluxo de caixa. Um VPL positivo e um tempo de retorno de 4,25 anos, para um período de investimento de 10 anos, garantiram a viabilidade econômica do equipamento em desenvolvimento pré-comercial.

Palavras-chave: Água de caldeira; Técnica ultrassônica; VPL; TIR; Payback; Osmose reversa.

1. Introdução

Conforme Sarpong et al. (2023) a análise da viabilidade econômica de um projeto de inovação (PI) envolve estudos de fases que abordam o mercado no qual se pretende atuar e uma previsão de faturamento. Somente de posse dessas informações é possível efetuar o cálculo de indicadores para avaliação sobre sua viabilidade econômica. Para elaborar uma análise de viabilidade econômica e financeira de um PI, somente deve se considerar fatores monetariamente conversíveis. Dessa forma, repercussões que não sejam ponderáveis, tais como: redução do impacto ambiental, nível de emprego, vendas futuras e boa vontade de clientes e fornecedores, em geral, são critérios imponderáveis (De Wit-De Vries; Dolfsma; van der Windt, 2019).

De posse dos valores conversíveis em dinheiro, são gerados indicadores econômicos que auxiliarão o processo de tomada de decisão. O Valor Presente Líquido (VPL) é uma ferramenta de avaliação econômica que permite ao investidor avaliar a rentabilidade de um investimento ao longo do tempo (SHOU, 2022). Ele é obtido através

da diferença entre o valor presente das entradas de caixa líquidas de um investimento e o valor presente das saídas de caixa líquidas do investimento. Também pode ser utilizado para comparar investimentos alternativos e ajudar a determinar qual deles é a melhor escolha. A Taxa Mínima de Atratividade (TMA) pode ser utilizada como uma medida para avaliar a rentabilidade de determinados investimentos (Adeleke et al., 2019). Trata-se de uma taxa de juros definida com base na taxa de juros praticada no mercado pela empresa. Esta taxa é importante para avaliação econômica e auxilia no processo de tomada de decisão. O Payback de um produto de inovação é uma medida de avaliação econômica que permite avaliar o tempo necessário para recuperar o investimento inicial feito na inovação. A taxa de retorno é calculada dividindo o investimento inicial pelo fluxo de caixa de retorno anual médio (Slobodnyak; Sosedova, 2021). O Payback deve ser considerado em conjunto com outras medidas de avaliação de investimentos, como o Valor Presente Líquido (VPL) e a Taxa Mínima de Atratividade (TMA), para garantir que o investimento seja rentável.

A inovação de que trata este trabalho de dissertação refere-se a um sistema que faz uso de ondas ultrassônicas de alta frequência para tratamento de dessalinização de água de alimentação de caldeiras. A tecnologia ultrassônica oferece vantagens significativas para a remoção de substâncias indesejáveis da água de caldeiras, incluindo a simplicidade do sistema, baixos custos de operação e consumo de energia, alta eficiência de remoção e flexibilidade para uso em diferentes aplicações. Brandão et al. (2022) descrevem a metodologia usada para avaliar o desempenho da tecnologia ultrassônica em diferentes sistemas de tratamento de água, bem como os resultados obtidos em comparação com a tecnologia de Osmose Reversa. Os resultados mostraram que a tecnologia ultrassônica foi capaz de remover minerais, como o cálcio e o magnésio, da água de caldeiras de forma eficiente. Os autores concluíram que a tecnologia ultrassônica pode ser usada como uma alternativa eficaz aos sistemas tradicionais de tratamento de água de caldeiras.

Com base nas premissas citadas faz-se necessário uma análise de viabilidade econômica e ambiental, essencial para a tomada de decisões informadas sobre possíveis negociações relacionadas a inovação desenvolvida. Isto deverá permitir que as organizações envolvidas possam avaliar os custos, benefícios e impactos ambientais para substituição do tecnologias de tratamento de água convencional pelo sistema ultrassônico proposto.

2. Material e Método

2.1. Inovação Tecnológica

O sistema de tratamento de água de caldeira atual de determinada empresa é do tipo Osmose Reversa. As características técnicas da Osmose Reversa serviram de parâmetros para comparação com o Sistema Ultrassônico de tratamento de água de caldeira - STUAC. A unidade de OR atende às necessidades da empresa que opera com vazão de 5000 L/h. Contudo, para a conclusão da fase atual de desenvolvimento do STUAC (unidade piloto), foi elaborado um projeto executivo para o STUAC operando a uma vazão de 500 L/h. A justificativa para essa diferença de capacidades nominais é de que nessa fase do desenvolvimento do devem ser realizados ajustes naturais da fase piloto (ANEEL, 2017):

Para o protótipo piloto do STUAC foram projetados compartimentos, onde a água bruta passa por processos de atomização ultrassônica (Panão, 2022) e condensação (Mohammed et al., 2023). Com perdas de contaminantes, os quais se despreendem do fluxo constituído pela névoa ultrassônica e um gás de arraste (ar atmosférico aquecido), a mistura sai ao final do processo em uma forma mais pura da água. Conforme a Figura 1, o STUAC constitui-se de dois estágios dispostos em série. O processo de tratamento da água é iniciado em cada estágio nas unidades evaporadoras ultrassônicas (1), onde o sistema de transdutores ultrassônicos (2) fará o processo de atomização da água a ser tratada, gerando uma névoa extremamente fina. Um sistema de dutos pneumáticos (3), preenchido com um fluxo de ar atmosférico sequestra calor do sistema, e é responsável pela alimentação de difusores internos de ar (4), que promovem o arraste da névoa salina para o sistema coletor localizado no topo da câmara de atomização (5). Este arraste transporta a mistura fluida gerada, cuja relação molar ar/água deverá ficar numa faixa adequada de operação. A névoa ultrassônica é então arrastada para as unidades condensadoras (6), onde dois trocadores de calor que fornecerão até 9600 Btu/h, promovendo a ação do vapor de água. No percurso entre a atomização e a condensação os sais de contaminação são liberados em função da redução considerável de solubilidade entre essas substâncias e a água em estado pseudocrítico. A água condensada é coletada para um tanque intermediário, e transferida para um próximo estágio (8), onde o processo será repetido. Na saída do último estágio a água condensada em um maior estado de pureza é coletada por um tanque final de estocagem de água tratada.

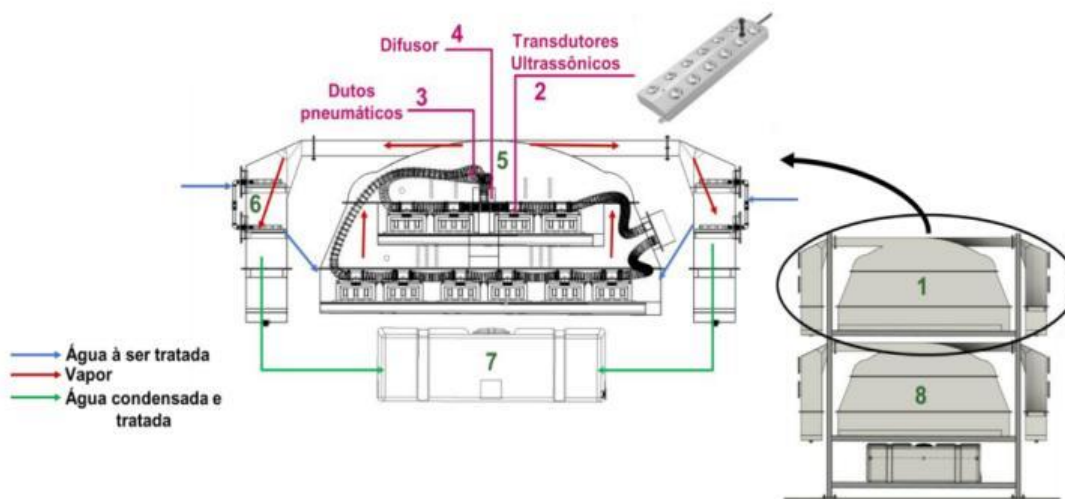


Figura 1. Diagrama esquemático dos constituintes básicos do protótipo piloto do sistema ultrassônico de tratamento de água de caldeira (STUAC): (a) Corte transversal dos estágios; (b) Vista frontal de um protótipo piloto de 500 L/h

2.2. Indicadores Econômicos

As técnicas de análise de investimentos existem para facilitar a tomada de decisão ou avaliação relacionada à viabilidade econômica de investimentos (Viña; Kipper; Moraes, 2022). Com base em um Fluxo de Caixa (FC) disponível, os métodos determinísticos para a análise de investimentos são: Valor Presente Líquido (VPL), Taxa Interna de Retorno (TIR) e o Payback (PB). Para se realizar um investimento, faz-se necessário o conhecimento de todas as entradas e saídas de recurso ao longo do tempo. As análises devem ser consistentes e baseadas em dados tão precisos quanto possível. Para tanto, faz-se necessário à utilização de um método denominado como fluxo de caixa, onde se demonstram todas as movimentações financeiras realizadas pela instituição pela qual o investimento seja realizado. O fluxo de caixa é também um instrumento de planejamento financeiro que tem por objetivo fornecer estimativas da situação do caixa da empresa em determinado período à frente. É de fundamental importância para a empresa, pois o fluxo de caixa informa à entidade todas as entradas e saídas de caixa, dando à empresa o conhecimento necessário para poder gastar, investir ou economizar.

Um valor presente representa as entradas e saídas de um FC hoje, ou seja, desconta o custo do capital do investimento (Dobrowolski; Drozdowski; Panait, 2022) O Valor Presente (VP) representa o valor de um montante do futuro trazido para o momento atual:

$$VP = \frac{FC_1}{(1+i)^1} + \frac{FC_2}{(1+i)^2} + \dots + \frac{FC_n}{(1+i)^n} \quad (1)$$

Em que:

VP – Valor presente de um fluxo de caixa;

n - número de períodos envolvidos em cada elemento da série de receitas e dispêndios do fluxo de caixa;

F_{Cn} – Fluxo de caixa futuro;

i – Taxa mínima de atratividade.

O Valor Presente Líquido (VPL) objetiva determinar um valor no instante considerado inicial, a partir de um fluxo de caixa formado de uma série de receitas e dispêndios (Martinez et al., 2021). Corresponde ao somatório algébrico de todos os valores envolvidos nos períodos considerados, reduzidos ao instante considerado inicial ou instante zero, a uma taxa de juros comparativa, representado pela Equação (2):

$$VPL = -F_{C0} + \frac{F_{C1}}{(1+i)^1} + \frac{F_{C2}}{(1+i)^2} + \dots + \frac{F_{Cn}}{(1+i)^n} \quad (2)$$

Em que:

VPL - valor presente líquido de um fluxo de caixa;

F_{C0} - Fluxo de caixa inicial.

O critério de viabilidade para o investimento, com base no método do VPL pode ser apresentado como:

- Se o VPL foi maior que zero, o investimento deve ser aceito;
- Se o VPL for igual à zero, torna-se indiferente a aceitação ou não do investimento;
- Se o VPL for menor que zero, o investimento não obteve êxito.

Quando se pretende investir, seja num empreendimento, seja numa aplicação financeira, há a motivação de se receber, em retorno, uma quantia de dinheiro que, em relação à quantia investida, corresponda, no mínimo, à correção pela taxa de atratividade, também chamada de expectativa ou taxa de equivalência. Esse ganho em devolução, comparado à quantia investida, constitui uma parcela percentual chamada de taxa interna de retorno.

A taxa interna de retorno (TIR) corresponde à taxa de juros que torna nulo o valor presente líquido. Logo, situação em que a soma algébrica de receitas e despesas será igual à zero, de modo que:

$$0 = -F_{C0} + \frac{F_{C1}}{(1+i)^1} + \frac{F_{C2}}{(1+i)^2} + \dots + \frac{F_{Cn}}{(1+i)^n} \quad (3)$$

Observe-se que a TIR não é uma medida de lucro, mas serve para que um valor possa ser comparado no tempo. É uma taxa na qual se iguala o valor presente de entrada a um investimento inicial. A Equação (3) é um critério de seleção de projetos de investimentos com base na avaliação do valor da TIR, o qual pode ter a seguinte interpretação Jurcevic et al., 2020:

- Se a TIR foi maior que a taxa mínima de atratividade, o investimento foi bem-sucedido;
- Se a TIR for igual a que a taxa mínima de atratividade, torna-se indiferente o sucesso do investimento;
- Se a TIR for menor que a taxa mínima de atratividade, o investimento não obteve êxito.

O prazo de recuperação de investimento, também conhecido por prazo de retorno ou *payback* (PB). O PB simples apresenta o tempo necessário para recuperar o capital principal sem utilizar taxa de desconto, amortiza-se o VP do empreendimento com as futuras entradas, na data zero (Hachem-Vermette; Singh, 2021). O PB descontado, além de recuperar o capital investido, considera o retorno mínimo exigido pelo investidor, as futuras entradas de caixa são trazidas a VP. O PB total considera os fluxos de caixa após a data de recuperação, no intuito de apresentar um prazo de equilíbrio ao longo de todo projeto e pode ser estimado por meio da Equação (4):

$$PB_{TOTAL} = \frac{F_{C0}}{\frac{F_{C1}}{(1+i)^1} + \frac{F_{C2}}{(1+i)^2} + \dots + \frac{F_{Cn}}{(1+i)^n}} \cdot t_a \quad (4)$$

Em que t_a é o número de tempo em anos. O Payback é também uma ferramenta que indica o prazo necessário para que os fluxos de caixa de entrada coincidam com o custo inicial, podendo ser classificados em duas maneiras, aquele que não considera o custo de Capital da empresa (*payback* simples) e o que considera o custo de Capital da empresa (*payback* descontado). Um longo *payback* implica em dizer que os valores investidos serão comprometidos por muitos anos e que os fluxos de caixa são provavelmente mais arriscados.

Os critérios de escolha de um Payback para um investimento incluem a capacidade de analisar o fluxo de caixa projetado do investimento, avaliar seu risco e determinar se é uma boa opção para o investidor (Shou, 2022). O Payback também deve ser comparado a outras opções disponíveis no mercado para avaliar se é a melhor escolha. Outros critérios importantes incluem considerar o custo de oportunidade, a disponibilidade de fundos para financiar o investimento, e a avaliação de qualquer restrição de fluxo de caixa. Além disso, é importante considerar o efeito imposto, o impacto na liquidez, o desempenho esperado e outros fatores que possam afetar o retorno sobre o investimento.

Matematicamente, o período de *payback* é o período para o qual:

$$C_0 = \sum C_t \quad (5)$$

Em que C_0 é o desembolso de caixa inicial e C_t é à entrada de caixa no período 't'. Por outro lado, o Período de Retorno Descontado (PBD) é o período PB para o qual:

$$C_0 = \frac{C_t}{(1+k)^t} \quad (6)$$

Em que 'k' é o custo de capital.

O PBD, em outras palavras, é simplesmente o período durante o qual o valor presente líquido acumulado de um projeto é igual à zero. Um projeto é aceitável se o PBD for menor que sua vida econômica ou algum período predeterminado à utilidade do critério de PBD sob padrões convencionais de fluxo de caixa. Desde então, a maioria dos livros de finanças incluiu o método DPP no capítulo de orçamento de capital, mas apenas em um grau limitado.

2.3. Elaboração do Fluxo de Caixa Projetado

As vantagens e desvantagens dos investimentos foram analisadas com auxílio de indicadores econômicos para projeção do fluxo de caixa por um período de 10 anos, com auxílio das seguintes premissas (Lin; Liu; Long, 2020):

- O Relatório Focus do Banco Central (BC) resume as estatísticas calculadas considerando as expectativas de mercado, coletadas até a sexta-feira anterior à sua divulgação. Ele é divulgado toda segunda-feira. O relatório traz a evolução gráfica e o comportamento semanal das projeções para índices de preços, atividade econômica, câmbio, taxa Selic, entre outros indicadores. As projeções são do mercado, não do BC.

- O Boletim Focus do BC mostrou na data de execução deste estudo uma inflação levemente acima da última projeção. A autoridade monetária informa que o Índice de Preços ao Consumidor Amplo (IPCA) tinha previsão de 6,59% para 2022, conforme definida em 18/03 do mesmo ano. Para os anos posteriores o Boletim Focus previa para o IPCA os seguintes valores: 2023 – 3,75%; 2024 – 3,75%; 2025 em diante – 3,00%.
- A taxa de juros básico da economia (taxa Selic), neste trabalho, representou a taxa de mínima atratividade (TMA) para os investimentos. As previsões do Boletim Focus para 2022, com base na data de 18/03/2022 foi de 13,00%. Para os anos posteriores os valores previstos pelo Focus eram: 2023 – 9,00%; 2024 – 7,50%; 2025 em diante – 7,00%.

A metodologia utilizada para calcular os gastos de capital (CAPEX) de ambos os processos STUAC-RO foi adaptada de Blandin et al. (2015). Devido aos dados limitados sobre custos do STUC, algumas suposições baseadas em valores do sistema de RO foram necessárias. Tomou-se como referência deste estudo, uma vez que os cenários apresentaram-se semelhantes para ambos (STUAC-RO) e, conseqüentemente, uma estimativa mais confiável do CAPEX do RO poderia ser alcançada.

Os custos de CAPEX foram divididos em custos diretos, dependendo da área de superfície da unidade RO (por exemplo, membranas, vasos de pressão) e custos independentes da área de superfície da unidade RO (por exemplo, pré-tratamento, admissão/emissário). Os custos independentes foram considerados constantes em todos os cenários. Essa abordagem fez com que o CAPEX associado à unidade de RO fosse apenas uma função da área da membrana, ou seja, de sua vazão nominal. Os cálculos de CAPEX para o STUAC foram fornecidos pela equipe técnica do Laboratório de Ultrassom do Instituto Avançado de Tecnologia e Inovação (IATI), onde foram realizados os estudos de concepção do desenvolvimento tecnológico. Neste caso, os valores de CAPEX final para o STUAC foram obtidos pela empresa de consultoria contratada para o estudo de mercado mencionado anteriormente. Apesar de serem necessários investimentos para implantação de uma unidade fabril de produção de STUAC o CAPEX correspondente foi considerado semelhante ao do RO.

A análise OPEX do dos sistemas incluiu demanda de energia, manuseio de filtros, substituição de membrana, reagentes químicos para limpeza de membrana, manutenção e mão de obra. O consumo de energia foi considerado para bombeamentos. O consumo de energia para as bombas centrífugas foi calculado de Kim et al., (2022).

O protocolo de limpeza da membrana incluiu (i) uma limpeza no local (CIP) realizada uma vez por semana com 500 mg/L e 2000 mg L⁻¹ de hipoclorito de sódio e ácido cítrico,

respectivamente, e (ii) duas limpezas anuais fora do local com 1000 mg/L e 2000 mg/L de hipoclorito de sódio e ácido cítrico, respectivamente (Li et al., 2022).

O fluxo de caixa utilizado por este EVTEA foi projetado para avaliar a compra de uma unidade de STUAC com capacidade para atender a uma demanda de 500 L/h, comparando-se o sistema ultrassônico com a unidade de OR de mesma capacidade. Os dados utilizados nesta análise de viabilidade, para serem ajustados à esta capacidade efetiva tanto para o STUAC quanto para o OR. Os ajustes de escala para o OR foram realizados com base em fatores de capacidade, temporal e econômico, conforme recomendado por Towler e Sinnott (2012), além de informações técnicas da equipe técnica da empresa financiadora do STUAC.

Os dados para elaboração do fluxo de caixa projetado são comentados a seguir:

a) Investimento

Os valores investidos na aquisição virtual de um STUAC de 500 L/h encontram-se na Tabela 1.

Tabela 1 – Valores a serem investidos na aquisição e instalação de um STUAC de 500 L/h

Item	Valor (R\$)
Fabricação e montagem mecânicas	305.000,00
Instalações elétrica e eletrônica	190.000,00
Automação e controle	104.000,00
Total	599.000,00

b) Estimativa de Possíveis Receitas

As receitas projetadas devido ao investimento na aquisição e instalação de um STUAC foram estimadas considerando simultaneamente diferenças no OPEX das duas unidades (STUAC-OR):

Receita 01 – Redução do desperdício de água: Valor estimado em função da não existência de um volume de água de rejeito pelo STUAC. No caso de um sistema de OR o volume de água transformado em rejeito foi estimado, em média, 50% da vazão da água de alimentação. Dessa forma, o valor da água recuperada com a operação do STUAC/1 foi estimado de acordo com o valor da tarifa cobrada pela concessionária de estado de Pernambuco (Quadro 1), com adição da taxa de esgoto. A expressão de cálculo utilizada é apresentada pela Equação (7).

Quadro 1 – Valores de tarifa industrial cobrado pela concessionária a partir de agosto de 2021

Categoria	Faixa de consumo (m ³)	Valor (R\$)
Industrial	até 10	71,81/mês
	>10	19,73/m ³

Receita 01 - Receita com redução da vazão da água de rejeito (R 01)

A água de rejeito para um sistema de RO é da Ordem de 30 a 50% da água de alimentação. No caso de um STUAC praticamente não existe desperdício com água de rejeito uma vez que tanto o líquido não tratado recircula para a câmara de sonicação/atomização.

$$R 01 = Q_{H2OR} \cdot t_{h/a} \cdot F_{UTIL} \cdot T_{CONCESSIONÁRIA} \quad (7)$$

Q_{H2OR} – Vazão de água de rejeito na operação de um OR de 500 L/h, m³/mês;

$t_{h/a}$ – Quantidade de horas por ano de operação, mês/a;

F_{UTIL} – Fator correspondente à fração de utilização anual da empresa contratante, -

$T_{COESSIONÁRIA}$ – Tarifa cobrada pela concessionária (Quadro 3) com os devidos ajustes, inclusive acréscimo de 50% (Dreno: Ligação convencional) correspondente à taxa de esgoto, R\$/mês.

Receita 02 – Economia com Limpeza Química (R 02)

Como a técnica de tratamento ultrassônico de água é essencialmente de natureza física, o não uso de produtos químicos torna-se uma forma de receita. A contabilização dessa economia com produtos químicos para o pré-tratamento da água bruta foi:

$$R 02 = CPQOR \quad (8)$$

Em que:

CPQOR – Custo de produto químico para uma unidade de OR de 500 L/h, R\$/ano;

Receita 03 – Economia com troca de membrana (R 03)

O custo com reposição de membranas constitui-se em um dos principais custos de manutenção de sistemas de OR. A substituição de membranas é uma operação crítica num OR, podendo ser necessária a cada período de 3 anos. Neste caso, os valores para esta receita foram distribuídos uniformemente:

$$R 03 = FCT \cdot NM \cdot CMOR, R\$/ano \quad (9)$$

Em que:

FCT – Fator de correção dos custos das membranas em função do tempo de vida de 3 anos para cada uma, em condições ideais de operação, -

NM – Número de membranas necessário para operação de um OR de 500 L/h, por mês, -

CMOR – Custo médio de uma membrana para um OR com a capacidade de 500 L/h, R\$

Receita 04 – Economia com troca de filtros de pré-tratamento (R 04)

O custo com reposição de pré-filtro é um outro fator importante, inclusive para que as membranas possam ser conservadas dentro do prazo desejado de vida útil garantida pelo fabricante.

$$R\ 04 = NPF \cdot CPFCD \quad (10)$$

Em que:

NPF – Número de pré-filtros necessários para um OR com capacidade para 500 L/h, -;

CPFCD – Custo médio de um pré-filtros necessário para um OR com a capacidade de 500 L/h; R\$

Receita 05 – Economia com Mão de Obra (R 05)

Com base nas características dos STUAC e em um sistema de OR a equipe de desenvolvedores fez uma estimativa de custos para os dois sistemas. O custo de mão de obra para um OR foi estimado como o triplo do custo para manutenção do STUAC:

$$R\ 05 = NOP \cdot CHH \cdot F_{UTIL} \cdot CMOOR \quad (11)$$

Em que:

NOP – Número de operadores por dia, -

CHH – Custo homem-hora, R\$/h

CMOOR – Custo de mão de obra para operação de um OR de 500 L/h, R\$/ano

Receita 06 – Energia Elétrica (R 06)

O custo com energia elétrica com OR é maior que com um STUAC. Dessa forma, o cálculo do consumo de energia elétrica com a diferença entre as potências totais dos motores, em ambos os sistemas, pode ser estimado como receita e custo operacional com energia elétrica:

$$R_{06} = 0,7355 \cdot P_T \cdot C_{TEE} \cdot T_{h/a} \cdot F_{UTIL} \quad (12)$$

Em que:

P_T – Soma total das potências dos motores existentes, cv

C_{TEE} – Custo da tarifa de energia elétrica, R\$/kWh

Na elaboração do fluxo de caixa projetado incluiu-se o Imposto de Renda Pessoa Jurídica (IRPJ), Contribuição Social sobre o Lucro Líquido (CSLL) e uma Taxa de Depreciação para o investimento, com base em valores tabelados pela Receita Federal (<https://www.mmcontabilidade.com.br/flash/taxasdepreciacao.htm>).

A opção de IRPJ/CSLL deve ser adotada quando o lucro efetivo (Receitas menos despesas efetivamente comprovadas) é inferior a 34% do faturamento do período e pode ser apurado trimestral ou anualmente. As alíquotas dos tributos para cálculo do IRPJ e da CSLL nessa modalidade são:

IRPJ: 15% para lucro até R\$ 20.000,00/mês;

IRPJ: 25% para Lucro acima de R\$ 20.000,00/mês;

CSLL: 9% sobre qualquer Lucro apurado.

Em resumo, no Lucro Real os dois tributos variam de 25% (10% + 15%) a 34% (9% + 25%), aplicados sobre o lucro e não sobre o faturamento.

Os bens móveis, imóveis e semoventes, estão sujeitos a depreciação, conforme a expectativa de vida útil de cada bem. A Receita Federal fixou as taxas aceitáveis como dedutíveis, conforme uma tabela, correspondente a um tempo de vida útil do equipamento ou componentes do mesmo.

3. Resultados e Discussão

3.1. Indicadores Econômicos

Explorando-se detalhadamente os custos de aquisição e instalação dos equipamentos (CAPEX), manutenção e operação deste investimento (OPEX), bem como os possíveis retornos, analisaram-se como esses fluxos de caixa podem ser aproveitados para impulsionar a saúde financeira da empresa e gerar lucro para os investidores. Alguns itens são importantes de serem ressaltados:

- Para permitir a comparação entre um STUAC e um OR, ambos com capacidade de 500 L/h, a empresa consultada para execução do *Business Plan* forneceu o custo de aquisição de um STUAC (CAPEX) com esta capacidade que foi de R\$ 226.757,25;

- Considerou-se que os custos com a depreciação, equivalente a 10% do valor do CAPEX durante 10 anos, retorna para o fluxo de caixa da empresa;
- Considerou-se, também, que o valor residual de 20% para o último ano do período de análise (10 anos), deveria ser adicionado ao fluxo de caixa da empresa, como uma receita não operacional.

Com base nas expressões de cálculo desenvolvidas com as Equações de (7) a (12) elaborou-se uma planilha contendo todas as entradas e todas as saídas de recursos financeiros por um período de 10 anos. Alguns dos valores de parâmetros necessários aos cálculos das receitas inclusas no fluxo de caixa são apresentados na Tabela 2. A planilha eletrônica elaborada para estimativas dos indicadores econômicos encontra-se disponível no Anexo 1. Ilustra o comportamento do fluxo de caixa através de seu saldo líquido em função do tempo (Figura 2).

$F_{UTIL} = 0,5$; $T_{h/a} = 8.640$; $0,7355$ – Fator de conversão, kW/cv; Tempo médio de vida das membranas em condições ideais – 3 anos; Valor do investimento para aquisição de um STUAC: R\$ 226.757,55.

Tabela 2 – Parâmetros utilizados nos cálculos dos custos operacionais anual do STUAC

Receita	Item	Fatores adicionais	Custo no primeiro ano (R\$)
R 01	Água de rejeito	Vazão de 500 L/h; T_{CONC} . R\$ 7.623,80/mês	45.642,80
R 02	Produtos químicos		799,73
R 03	Membranas	4 membranas para 500 L/h a cada 3 anos; R\$ 2085,00/membrana	12.340,00
R 04	Pré-filtro	5 pré-filtros/ano	500,00
R 05	Mão de obra	CHH = R\$ 1662,00/mês	8.085,00
R 07	Energia elétrica	R\$ 1800,00/mês; Pot motora de 4 kW; R\$ 0,40/kWh	5.154,00
Total			72.521,80

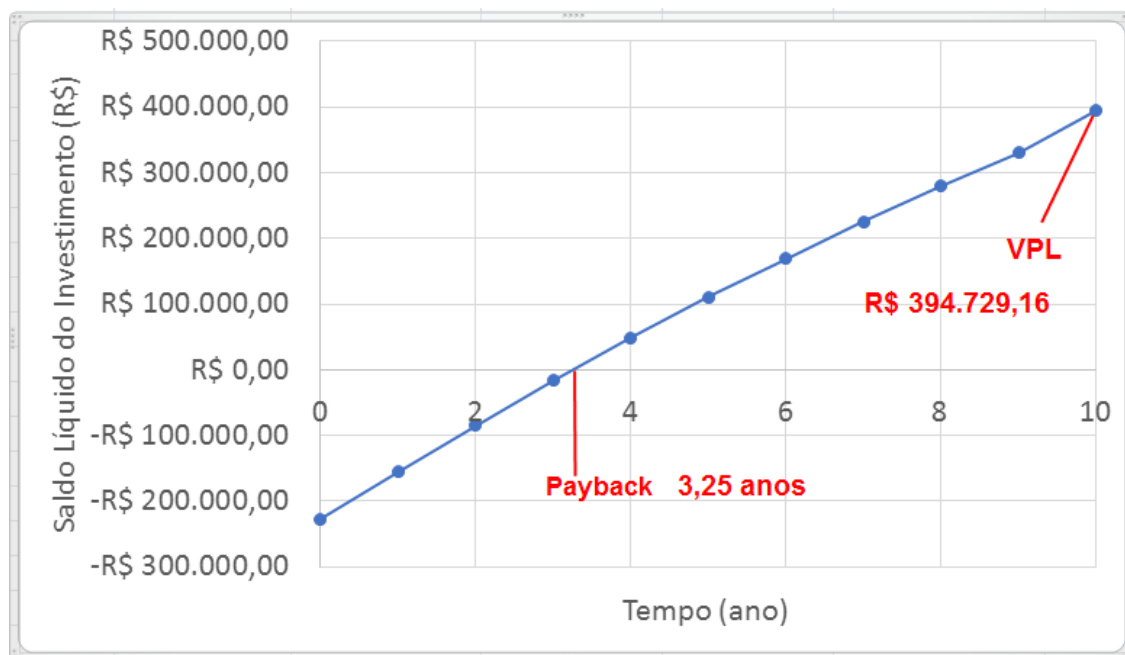


Figura 2 – Saldo líquido do investimento de aquisição do STUAC com obtenção de uma TIR de 26,16% aa

3.2. Indicadores Ambientais

Quando comparada com outras tecnologias, a exemplo da Osmose Reversa, o STUAC mostrou ao longo desta pesquisa uma eficiência semelhante no tratamento de água de caldeira. Esta alta eficiência demonstrada contribui para a redução de produtos químicos comumente utilizados em estações de tratamento de efluentes convencionais. Contudo, a técnica de US contribui não só com a redução de impactos ambientais que viessem a ser causados pelo descarte de efluentes contaminados em solo ou água, como também aumenta a sustentabilidade do processo de tratamento pela redução do uso de produtos químicos e, conseqüente redução da emissão de gases de efeito estufa (GEE). Uma estimativa de descarte de resíduo sólido para os sistemas de STUAC e OR, por um período de três anos, é apresentada na Tabela 3.

Tabela 3 - Parâmetros relativos aos descartes de resíduos sólidos para os sistemas STUAC/TUTA e OR por um período de três anos

Resíduo	STUAC	Osmose Reversa	
		Membrana	Filtro de Cartucho
Massa, kg/ano	0,2	18	30
Composição	Cerâmica piezoelétrica: PbZrO ₃ e PbTiO ₃	Poliamida, polisulfona e poliester	Polipropileno
Estabilidade	Inerte	Inerte	Inerte
Periculosidade	Não perigoso	Não perigoso	Não perigoso

4. Conclusão

A demonstração do conceito de Sistema Ultrassônico de Tratamento de Água de Caldeira (STUAC) foi desenvolvida e mostrou potencial para a tarefa desse tipo de tratamento (Brandão et al., 2022). Um VPL positivo ao final do período de análise de 10 anos, sob uma TIR acima da taxa de atratividade mínima (TMA) oferecida pelo mercado e um payback menor que metade do período de análise, mostrou que também existe viabilidade econômica. O conceito encaixou-se na crescente demanda por água pura sem a inclusão de formas de tratamento que dê origem a novos rejeitos, principalmente aqueles que incluam quantidades consideráveis de produtos químicos no meio ambiente.

A água produzida tem diversas aplicações, tais como irrigação e industriais. Contudo, essa água devidamente dosada de sais poderá ser também utilizada para consumo humano; uma vez que o tratamento com técnicas ultrassônicas descontamina o meio de microrganismos perigoso para a saúde humana (Kernou et al., 2021).

Após a aplicação deste EVTEA, verificou-se que o (STUAC) é economicamente viável. A contratação de uma empresa para elaborar um estudo de mercado permitiu uma estimativa precisa para o CAPEX (Capital Expenditure) do investimento. Uma comparação entre o STUAC e o Osmose Reversa (OR) tornou a elaboração do fluxo de caixa mais fácil de ser analisado, uma vez que pela comparação substituiu-se os índices específicos de cada sistema de tratamento por termos de comparação direta dentro da avaliação do OPEX (Operational Expenditure) na planilha de cálculos do fluxo de caixa.

Na análise dos parâmetros econômicos de interesse para o investimento obteve-se um VPL positivo, de R\$ 394.729,16, uma TIR de ordem de 26,16% e um Payback de 3 anos e 3 meses. Dessa forma esses valores foram considerados muito atrativos.

A parte relativa às características ambientais do STUAC foi atribuída à redução, praticamente eliminação do uso de produtos químicos e à grande redução de água de rejeito em relação ao sistema de Osmose Reversa. Tais características ambientais foram intensamente usadas pela empresa consultora para estudos de mercado e de *marketing* do STUAC.

O STUAC apresentou importantes contribuições para a área de tratamento de água de caldeira. Algumas destas contribuições foram:

- Desenvolvimento de um protótipo em escala de bancada de um sistema ultrassônico de tratamento de água de caldeira, consistindo da atomização de água por vibrações ultrassônicas (US);

- O STUAC opera a pressões próximas da atmosférica e temperatura máxima de 70 °C, o que permitiria o uso de material de baixo custo em caso de expansão;

- A temperatura máxima, apresentada como uma limitação da capacidade de aquecimento do ar de arraste, pode ser conseguida apenas como aproveitamento da inércia térmica – energia disponível na fase líquida não atomizada durante o processo de vaporização ultrassônica;

- A ferramenta estatística multivariada de Análise de Componentes Principais, permitiu a identificação das variáveis relevantes para o processo.

A execução de um plano de negócios por uma empresa de consultoria demonstrou que existe demanda para o STUAC em: usinas termelétricas, consumidores residenciais de comunidades de regiões com baixa disponibilidade de água doce; usinas de açúcar e álcool, indústrias têxteis; indústrias petroquímicas; hospitais e clínicas; indústrias agrícolas, entre outras.

Estudos futuros são necessários para confirmar um número economicamente viável de estágios para diferentes faixas de salinidade da água bruta na alimentação de caldeiras para diferentes capacidades de produção de vapor.

Adicionalmente o sistema apresenta um importante valor social, pois sua avaliação positiva para mercado, resultado de consulta a uma empresa especializada, demonstrou grande possibilidade de criação de emprego pela instalação de uma unidade fabril para produção de unidades de diferentes capacidades. Além de tudo isso, a instalação que der origem aos testes piloto poderia ser utilizada para um centro de aprendizagem para

estudantes de graduação nas áreas de gerenciamento térmico, eletrônica, química da água, etc.

Agradecimentos: Os autores agradecem pelo financiado a este estudo promovido pelo Programa de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL-PD-2901-0002/2019) e pela Termoelétrica TERMOCABO. Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e à Fundação de Amparo à Ciência e tecnologia de Pernambuco pelas bolsas concedidas. Agradecem ainda ao Laboratório de Ultrassom do Instituto Avançado de Tecnologia e Inovação (IATI), ao laboratório de Instrumentação da Escola Unicap-Icam Tech da Universidade Católica de Pernambuco (UNICAP) e da Rede Nordeste de Biotecnologia (RENORBIO).

Referências

Abbott, J.H., Wilson, R., Pryymachenko, Y. *et al.* Economic evaluation: a reader's guide to studies of cost-effectiveness. *Arch Physiother* **12**, 28 (2022). <https://doi.org/10.1186/s40945-022-00154-1>

Adeleke, T.B.; Ogbemor, O. E.; Igboanugo, A.C.; Momodu, A.I. Development of Internal Rate of Return (IRR) Calculator, *Journal of Science and Technology Research* 1(2) 2019 pp. 27-40 ISSN-2682-5821.

ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. Procedimentos do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento – PROP&D – Módulo 2, 2017. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/>. Acesso em: 12 Jan. 2017.

Blandin, G., Verliefe, A.R.D., Tang, C.Y., Le-Clech, P., 2015. Opportunities to reach economic sustainability in forward osmosis–reverse osmosis hybrids for seawater desalination. *Desalination* 363, 26–36.

Brandão, Y.F.F.; Dos Santos, L.B.; De Araujo, G.P.; Pedrosa Junior, L.P.; Da Costa Neto, B.F.; Da Silva, R.D.C.F.S.; Benachour, M.; Converti, A.; Sarubbo, L.A.; Dos Santos, V.A. Use of High-Frequency Ultrasound Waves for Boiler Water Demineralization/Desalination Treatment. *Energies* 2022, 15, 4431. <https://doi.org/10.3390/en15124431>

De Wit-De Vries, W.A.E.; Dolfsma, H.J.; Van Der Windt, M.P. Gerkema Knowledge transfer in university–industry research partnerships: a review, *J. Technol. Tran.*, 44 (4) (2019), pp. 1236-1255

Dobrowolski Z, Drozdowski G, Panait M. Understanding the Impact of Generation Z on Risk Management-A Preliminary Views on Values, Competencies, and Ethics of the Generation

Z in Public Administration. **Int J Environ Res Public Health**. 2022 Mar 24;19(7):3868. doi: 10.3390/ijerph19073868. PMID: 35409550; PMCID: PMC8997496.

Hachem-Vermette, C. ; Singh, K. (2021) Analysis of Urban Energy Resources to Achieve Net-Zero Energy Neighborhoods. **Front. Sustain. Cities** 3:663256. doi: 10.3389/frsc.2021.663256

Jin, X. ; Liu, Q. ; Long, H. Impact of cost–benefit analysis on financial benefit evaluation of investment projects under back propagation neural network. **Journal of Computational and Applied Mathematics** Volume 384, 1 March 2021, 113172. <https://doi.org/10.1016/j.cam.2020.113172>

Jurcevic, J.; Pavić, I.; Cović, N.; Dolinar, D.; Zoričić, D. Estimation of Internal Rate of Return for Battery Storage Systems with Parallel Revenue Streams: Cycle-Cost vs. Multi-Objective Optimisation Approach. **Energies** 2022, 15, 5859. <https://doi.org/10.3390/en15165859>

Kernou, O.N. ; Belbahi, A. ; Amir, A. ; Bedjaoui, K.; Kerdouche, K. ; Dairi, S. Etal. Effect of sonication on microwave inactivation of Escherichia coli in an orange juice beverage. **J. Food Process Eng.** 2021;44 (5):e13664

Kim, H.I.; Roh, T.-S.; Huh, H.; Lee, H.J. Development of Ultra-Low Specific Speed Centrifugal Pumps Design Method for Small Liquid Rocket Engines. **Aerospace** 2022, 9, 477. <https://doi.org/10.3390/aerospace9090477>

Li, D. ; Zhang, X. M.; Hao, J. Y.; Ma, Q. H.; Fu, B. A Study On The Evaluation Method of MBR Membrane Replacement Using Permeability Attenuation. **International Journal of Science Academic Research** Vol. 03, Issue 06, pp.3932-3941, June, 2022 Available online at <http://www.scienceijsar.com>.

Martinez, N.; Tabares, A.; Franco, J.F. Generation of Alternative Battery Allocation Proposals in Distribution Systems by the Optimization of Different Economic Metrics within a Mathematical Model. **Energies** 2021, 14, 1726. <https://doi.org/10.3390/en14061726>

Mohammed, M.; Alqahtani, N.K.; Asfahan, H.M.; Sultan, M. Evaporation-Assisted Humidification–Dehumidification Cycles for Desalination Application in Tropical and Subtropical Regions. **Water** 2023, 15, 1125. <https://doi.org/10.3390/w15061125>

Panão, M. Ultrasonic Atomization: New Spray Characterization Approaches. *Fluids* 2022, 7, 29. <https://doi.org/10.3390/fluids7010029>

Rodrigues, L.M.; Soares, T.; Rezende, I.; Fontoura, J.P.; Miranda, V. Economic Analysis of a Hydrogen Power Plant in the Portuguese Electricity Market. *Energies* 2023, 16, 1506. <https://doi.org/10.3390/en16031506>

Sarpong, D.; Boakye, D.; Ofosu, D.; Botchie, D. The three pointers of research and development (R&D) for growth-boosting sustainable innovation system. *Technovation*, Volume 122, April 2023, <https://doi.org/10.1016/j.technovation.2022.102581>

Shou, T. A Literature Review on the Net Present Value (NPV) Valuation Method. *Advances in Economics, Business and Management Research*, volume 656 Proceedings of the 2022 2nd International Conference on Enterprise Management and Economic Development (ICEMED 2022).

Shou, T. A Literature Review on the Net Present Value (NPV) Valuation Method. *Advances in Economics, Business and Management Research*, volume 656 Proceedings of the 2022 2nd International Conference on Enterprise Management and Economic Development (ICEMED 2022).

Slobodnyak, I.; Sosedova, E. Analysis of Methodical Approaches to the Innovation Efficiency Assessment. *E3S Web of Conferences* 295, 01016 (2021) WFSDI 2021 <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202129501016>

Towler, G.P. ; Sinnott, R. Chemical engineering design: principles, practice, and economics of plant and process design. – 2nd ed. Amsterdam : Elsevier, 2012. ISBN 978-0-08-096659-

CAPÍTULO IV

CONSIDERAÇÕES FINAIS

4. Considerações Finais

O desenvolvimento do sistema ultrassônico de tratamento de água de alimentação de caldeira (STUAC) apresentou importantes contribuições para a área de tratamento de água de caldeira. Algumas destas contribuições foram:

- Desenvolvimento de um protótipo em escala de bancada de um sistema ultrassônico de tratamento de água de caldeira, consistindo na atomização de água por vibrações ultrassônicas (US);

- O STUAC opera a pressões próximas da atmosférica e temperatura máxima de 70 °C, o que permitiria o uso de material de baixo custo em caso de expansão;

- A temperatura máxima, apresentada como uma limitação da capacidade de aquecimento do ar de arraste, pode ser conseguida apenas como aproveitamento da inércia térmica – energia disponível na fase líquida não atomizada durante o processo de vaporização ultrassônica;

- A ferramenta estatística multivariada de Análise de Componentes Principais, permitiu a identificação das variáveis relevantes para o processo.

Os resultados do EVTEA sugeriram que o STUAC:

- Pode ser uma importante opção para a dessalinização da água de alimentação de caldeira em comparação à técnica de Osmose Reversa;

- O volume muito baixo de rejeitos (cerca de 2% por passagem) é outra vantagem relativa ao OR;

- A ausência de uma etapa de pré-tratamento de água bruta é outra vantagem.

A análise de viabilidade técnica, econômica e ambiental, com base na comparação entre o STUAC e o OR, ambos com capacidade para dessalinização de água de caldeira de 500 L/h, permitiram uma avaliação do investimento, demonstrando alta rentabilidade para a empresa investidora com retorno financeiro em 3 anos e 3 meses (TIR de 26,16% e VPL de R\$ 394.729,16), além dos seguintes itens:

- Redução do custo com produtos químicos no tratamento de águas para caldeiras;

- Redução do desperdício de água, se comparara a solução desenvolvida nesse projeto com a alternativa de um equipamento de OR;

- Redução do custo com mão de obra para substituição de peças e acessórios, se comparado com a alternativa de um equipamento de osmose reversa;

- Redução de custo com mão de obra para manutenção e limpeza dos dutos da caldeira devido a melhor qualidade da água;
- Redução de custo com serviço especializado de descarte de resíduos.

A execução de um plano de negócios por uma empresa de consultoria demonstrou que existe demanda para o STUAC em: usinas termelétricas, consumidores residenciais de comunidades de regiões com baixa disponibilidade de água doce; usinas de açúcar e álcool, indústrias têxteis; indústrias petroquímicas; hospitais e clínicas; indústrias agrícolas, entre outras.

Estudos futuros são necessários para confirmar um número economicamente viável de estágios para diferentes faixas de salinidade da água bruta na alimentação de caldeiras para diferentes capacidades de produção de vapor.

APÊNDICE

FLUXO DE CAIXA PROJETADO PARA O STUAC LEVANDO-SE EM CONSIDERAÇÃO AS VANTAGENS ECONÔMICAS SOBRE UM SISTEMA DE OR

Ano	CAPEX	Receitas	OPEX	Lucro Bruto	Depreciação	Base cálculo IRR	IRR	FLUXO DE CAIXA	FLUXO DESCONTADO	SALDO LÍQUIDO
0	-R\$ 226.757,55	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	-R\$ 226.757,55	-R\$ 226.757,55	-R\$ 226.757,55
1	R\$ 0,00	R\$ 72.521,80	R\$ 0,00	R\$ 72.521,80	R\$ 22.675,76	R\$ 49.846,05	R\$ 16.947,66	R\$ 78.249,90	R\$ 71.788,90	-R\$ 154.968,65
2	R\$ 0,00	R\$ 77.300,99	R\$ 0,00	R\$ 77.300,99	R\$ 22.675,76	R\$ 54.625,23	R\$ 18.572,58	R\$ 81.404,16	R\$ 70.441,68	-R\$ 84.526,97
3	R\$ 0,00	R\$ 80.199,77	R\$ 0,00	R\$ 80.199,77	R\$ 22.675,76	R\$ 57.524,02	R\$ 19.558,17	R\$ 83.317,36	R\$ 68.011,79	-R\$ 16.515,19
4	R\$ 0,00	R\$ 83.207,27	R\$ 0,00	R\$ 83.207,27	R\$ 22.675,76	R\$ 60.531,51	R\$ 20.580,71	R\$ 85.302,31	R\$ 65.076,72	R\$ 48.561,53
5	R\$ 0,00	R\$ 85.703,48	R\$ 0,00	R\$ 85.703,48	R\$ 22.675,76	R\$ 63.027,73	R\$ 21.429,43	R\$ 86.949,81	R\$ 61.994,01	R\$ 110.555,55
6	R\$ 0,00	R\$ 88.274,59	R\$ 0,00	R\$ 88.274,59	R\$ 22.675,76	R\$ 65.598,83	R\$ 22.303,60	R\$ 88.646,74	R\$ 59.069,07	R\$ 169.624,61
7	R\$ 0,00	R\$ 90.922,83	R\$ 0,00	R\$ 90.922,83	R\$ 22.675,76	R\$ 68.247,07	R\$ 23.204,00	R\$ 90.394,58	R\$ 56.293,20	R\$ 225.917,81
8	R\$ 0,00	R\$ 93.650,51	R\$ 0,00	R\$ 93.650,51	R\$ 22.675,76	R\$ 70.974,75	R\$ 24.131,42	R\$ 92.194,85	R\$ 53.658,24	R\$ 279.576,05
9	R\$ 0,00	R\$ 96.460,03	R\$ 0,00	R\$ 96.460,03	R\$ 22.675,76	R\$ 73.784,27	R\$ 25.086,65	R\$ 94.049,13	R\$ 51.156,49	R\$ 330.732,55
10	R\$ 45.351,51	R\$ 144.705,34	R\$ 0,00	R\$ 144.705,34	R\$ 22.675,76	R\$ 122.029,58	R\$ 41.490,06	R\$ 125.891,03	R\$ 63.996,62	R\$ 394.729,16
VPL (R\$)									R\$ 394.729,16	
TIR (%)									26,16%	
PAYBACK DESCONTADO (ano)										3,25

Figura A1 - Planilha com fluxos de caixa projetado para um horizonte de 10 anos objetivando a viabilidade de um projeto em escala Piloto para instalação do STUAC com capacidade nominal de 500 L/h

