



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUIMICA

JULIANA FRANCELINO DE OLIVEIRA

**RECUPERAÇÃO DE ÁGUA DE CALDO DE CANA-DE-AÇÚCAR ORIUNDO DA
INDÚSTRIA SUCROALCOOLEIRA COM USO DE ULTRASSOM**

RECIFE-PE

2024

JULIANA FRANCELINO DE OLIVEIRA

**RECUPERAÇÃO DE ÁGUA DE CALDO DE CANA-DE-AÇÚCAR ORIUNDO DA
INDÚSTRIA SUCROALCOOLEIRA COM USO DE ULTRASSOM**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do título de mestra em Engenharia Química. Área de concentração: Engenharia de processos químicos e bioquímicos.

Orientador: Mohand Benachour

Coorientador: Valdemir Alexandre dos Santos

Financiamento: Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES)

RECIFE-PE

2024

.Catalogação de Publicação na Fonte. UFPE - Biblioteca Central

Oliveira, Juliana Francelino de.

Recuperação de água de caldo de cana-de-açúcar oriundo da indústria sucroalcooleira com uso de ultrassom / Juliana Francelino de Oliveira. - Recife, 2024.

64f.: il.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Ciências Exatas e da Natureza, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, 2024.

Orientação: Mohand Benachour.

Coorientação: Valdemir Alexandre dos Santos.

Inclui referências.

1. Atomização Ultrassônica; 2. Indústria Sucroalcooleira; 3. MSR; 4. Planejamentos Experimentais; 5. Recuperação de Água; 6. Sustentabilidade. I. Benachour, Mohand. II. Santos, Valdemir Alexandre dos. III. Título.

UFPE-Biblioteca Central

JULIANA FRANCELINO DE OLIVEIRA

**RECUPERAÇÃO DE ÁGUA DE CALDO DE CANA-DE-AÇÚCAR ORIUNDO DA
INDÚSTRIA SUCROALCOOLEIRA COM USO DE ULTRASSOM**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Pernambuco, Centro Acadêmico de Tecnologia e Geociências, como requisito para a obtenção do título de Mestra em Engenharia Química. Área de concentração: Engenharia de Processos Químicos e Bioquímicos.

Aprovada em: 26/02/2024.

BANCA EXAMINADORA

Participação por Videoconferência

Prof. Dr. Marcos Antônio Barbosa de Lima (Examinador Externo)
Universidade Federal Rural de Pernambuco

Participação por Videoconferência

Prof. Dr. Nelson Medeiros de Lima Filho (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Participação por Videoconferência

Profa. Dra. Patrícia Moreira Azoubel (Examinadora Interna)
Universidade Federal de Pernambuco

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço por me capacitar a superar as adversidades da jornada acadêmica.

Em especial, à minha família representada pelo meu esposo Kennedy, por incentivar-me a seguir em frente e por ser o suporte que eu preciso nos momentos mais difíceis.

Ao professor Dr. Mohand Benachour, meu orientador e ao professor Dr. Valdemir Alexandre dos Santos pelo cuidado, atenção, orientação, carinho paternal e conselhos que foram essenciais nessa caminhada.

À Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) pela oportunidade de seguir em mais essa etapa da minha vida profissional.

À Universidade Católica de Pernambuco (UNICAP) pelo suporte na realização da pesquisa.

Aos companheiros de vida acadêmica que deixaram esse período mais leve e pela amizade.

A todos os funcionários do DEQ, em especial aos professores pelo conhecimento desenvolvido durante esse tempo.

Aos meus amigos que me apoiaram e incentivaram.

À banca, pelos comentários e considerações que contribuíram para aperfeiçoar o desenvolvimento desse trabalho.

Agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro concedido através da bolsa de mestrado.

E a todos que de alguma forma contribuíram para a concretização desse trabalho, muito obrigada.

RESUMO

Neste estudo investigou-se a aplicação de ondas ultrassônicas na atomização do caldo da cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*), para recuperação de água na indústria sucroalcooleira, uma vez que esta técnica da engenharia verde equivale a cerca de 10% da energia gasta para vaporização térmica da água. Dada a grande quantidade de água utilizada nos processos de produção de açúcar e etanol, a implementação de técnicas eficazes de recuperação de água não apenas minimiza o impacto ambiental através da redução do consumo e do desperdício de água, mas também contribui para a redução de custos operacionais. Utilizou-se a metodologia de superfície de resposta (MSR) para analisar como diferentes variáveis influenciam a eficiência da recuperação de água utilizando-se evaporação a frio por atomização ultrassônica em um único estágio. Em um protótipo de bancada com capacidade para 3 L/h a vazão do ar de arraste (X_1), a temperatura do ar de arraste (X_2), os SST (Sólidos Totais Solúveis) do caldo de alimentação (X_3) e pressão na câmara de atomização (X_4) foram submetidas a um planejamento fatorial fracionário do tipo 2^{4-1} . Em seguida, no mesmo protótipo laboratorial, foi aplicado um delineamento composto central rotacional (DCCR) do tipo 2 para a atomização do caldo de cana. Os resultados obtidos indicaram que a concentração máxima alcançada, em um único estágio, foi de 93,15 SST. A comparação das propriedades de composição e físico-químicas do caldo residual sonificado mostraram que o Ultrassom (US) não interfere de modo prejudicial nas propriedades do caldo de cana-de-açúcar como insumo para a indústria sucroalcooleira. O reuso da água recuperada foi recomendado para a maioria das aplicações internas de processos da indústria sucroalcooleira, após ajustes no pH, com exceção da alimentação de caldeiras. A aplicação de ondas ultrassônicas garante significativamente a separação de água, contribuindo para um processo mais sustentável e eficiente. O estudo revelou que a combinação adequada das variáveis independentes pode maximizar a recuperação de água, demonstrando a importância do planejamento experimental no aprimoramento dos processos industriais.

Palavras-chave: Atomização Ultrassônica, Indústria Sucroalcooleira, MSR, Planejamentos Experimentais, Recuperação de Água, Sustentabilidade.

ABSTRACT

This study investigated the application of ultrasonic waves for atomizing sugarcane juice (*Saccharum officinarum*) to recover water in the sugarcane alcohol industry. This green engineering technique consumes about 10% of the energy used in thermal water vaporization. Given the large amount of water used in sugar and ethanol production, effective water recovery techniques not only minimize environmental impact by reducing water consumption and waste, but also contribute to operational cost reductions. The response surface methodology (RSM) was used to analyze how different variables influence water recovery efficiency using cold evaporation through single-stage ultrasonic atomization. In a laboratory prototype with a capacity of 3 L/h, the variables of air flow rate (X1), air temperature (X2), feed juice STS (Soluble Total Solids) (X3), and atomization chamber pressure (X4) were subjected to a fractional factorial design of , type 2^{4-1} . Subsequently, a rotational central composite design (RCCD) of type 2^4 was applied for the atomization of sugarcane juice in the same prototype. The results obtained indicated that the maximum concentration reached, in a single stage, was 93.15 SST in a single stage. A comparison of the composition and physicochemical properties of the sonicated residual juice showed that ultrasonic treatment does not adversely affect the properties of sugarcane juice as a feedstock for the sugar-alcohol industry. The reuse of recovered water is recommended for most internal process applications in the sugarcane alcohol industry, following pH adjustments, with the exception of boiler feed water. The application of ultrasonic waves significantly ensures water separation, contributing to a more sustainable and efficient process. The study revealed that the proper combination of independent variables can maximize water recovery, demonstrating the importance of experimental planning in improving industrial processes.

Keywords: Experimental Designs, RSM, Sugar-Alcohol Industry, Sustainability, Ultrasonic Atomization, Water Recovery.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 –	Espectros de onda sonora	9
Figura 2 –	Configuração de um transdutor de US	10
Figura 3 –	Cavitação acústica	11
Figura 4 –	Cavitação inercial (parte superior da figura) e não inercial (parte inferior da figura)	11
Figura 5 –	Ciclo de uma bolha em um processo de cavitação inercial	12
Figura 6 –	Fluxograma do processo produtivo de açúcar, álcool e melação	18
Figura 7 –	Diagrama esquemático do protótipo de bancada utilizado para atomização do caldo de cana-de-açúcar com ondas ultrassônica de alta frequência	31
Figura 8 –	Protótipo de bancada utilizado para atomização do caldo da cana-de-açúcar	32
Figura 9 –	Esboço das propriedades psicrométricas do ar em diferentes pontos do protótipo de bancada de atomização ultrassônica do caldo de cana	33
Figura 10 –	Cana-de-açúcar (<i>Saccharum officinarum</i>) da variedade RB 86 7515	34
Figura 11 –	Diagrama de Pareto para ilustração da classificação dos efeitos mais significativos do DCCR do protótipo de bancada	42
Figura 12 –	Superfície de resposta para o SST do caldo residual em função da vazão (X1) e da temperatura do ar de arraste (X2)	43
Figura 13 –	Superfície de resposta para o SST do caldo residual em função da vazão (X1) e do SST do caldo de alimentação (X3)	44
Figura 14 –	Superfície de resposta para o SST do caldo residual em função da vazão (X1) e da pressão manométrica interna do protótipo de bancada (X4)	45
Figura 15 –	Superfície de resposta para o SST do caldo residual em função da temperatura do ar de arraste (X2) e da SST do caldo de alimentação (X3)	46

Figura 16 – Superfície de resposta para o SST do caldo residual em 46
função da temperatura do ar de arraste (X2) e da da pressão
manométrica interna do protótipo de bancada (X4)

Figura 17 – Superfície de resposta para o SST do caldo residual em 47
função SST do caldo de alimentação (X3) e da pressão
manométrica interna do protótipo de bancada (X4)

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Caracterização do caldo da cana-de-açúcar	21
Tabela 2 –	Características físico-químicas de alguns tipos de águas de alimentação de caldeiras para reuso nas usinas de açúcar e álcool	24
Tabela 3 –	Variáveis reais e codificadas para o planejamento fatorial fracionário 2^{4-1} aplicada ao protótipo de bancada utilizado nesta pesquisa	36
Tabela 4 –	Matriz de planejamento do fatorial fracionário 2^{4-1} aplicado na seleção dos parâmetros estatisticamente importantes para a recuperação da água do caldo de cana no protótipo ultrassônico de bancada	38
Tabela 5 –	Tabela de ANOVA correspondente ao planejamento fatorial fracionário aplicado ao protótipo ultrassônico de bancada utilizado nos experimentos de recuperação da água contida no caldo de cana	38
Tabela 6 –	Variáveis reais e codificadas do DCCR aplicado ao protótipo ultrassônico de bancada utilizado nos experimentos de recuperação da água contida no caldo de cana	39
Tabela 7 –	Matriz de planejamento do DCCR com valores da variável resposta obtidos após experimentos com o protótipo ultrassônico de recuperação de água de caldo de cana	40
Tabela 8 –	Tabela de ANOVA para os resultados do DCCR da separação ultrassônica da água do caldo de cana no protótipo de bancada utilizado nesta pesquisa	41
Tabela 9 –	Valores de parâmetros característicos do caldo de cana-de-açúcar sem e com a interação com campo ultrassônico para sua vaporização a frio	49
Tabela 10 –	Parâmetros físico-químicos mostrando as semelhanças entre a água recuperada e a água adequada para reuso para resfriamento	50

Sumário

1 INTRODUÇÃO	7
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	9
2.1 REFERENCIAL TEÓRICO	9
2.1.1 Princípios do ultrassom	9
2.1.2 Atomização ultrassônica	13
2.1.3 Parâmetros de atomização ultrassônica.....	13
2.1.4 O processo produtivo da Indústria sucroalcooleira e a água	15
2.1.5 Propriedades do caldo da cana-de-açúcar	19
2.1.6 Humidificação-Desumidificação	21
2.1.7 Qualidades de água para demandas da usina	23
2.1.8 Planejamento experimental	24
2.2 ESTADO DA ARTE	27
3 MATERIAL E MÉTODOS	30
3.1 ARRANJO EXPERIMENTAL.....	30
3.2 CARACTERIZAÇÃO DO CALDO DE CANA-DE-AÇÚCAR	33
3.3 ESTUDO PARAMÉTRICO DA RECUPERAÇÃO DE ÁGUA NO PROTÓTIPO	36
3.4 ANÁLISE DA ÁGUA OBTIDA APÓS ATOMIZAÇÃO PARA USO EM CALDEIRAS	36
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	38
4.1 REALIZAÇÃO DE EXPERIMENTOS NO PROTÓTIPO DE BANCADA	38
4.2 EFEITO DO ULTRASSOM SOBRE O CALDO DE CANA.....	48
4.3 O REUSO E O EFEITO DO ULTRASSOM NA ÁGUA RECUPERADA.....	49
5 CONCLUSÃO CONSIDERAÇÕES FUTURAS	51
6 REFERÊNCIAS	52

1 INTRODUÇÃO

A sustentabilidade no uso dos recursos hídricos é um desafio crescente, especialmente em setores industriais intensivos como o sucroalcooleiro. No Brasil, onde essa indústria é de grande importância econômica e ambiental, a eficiência na gestão da água torna-se importantíssima (ISSAOUI *et al.*, 2022; OLIVEIRA *et al.*, 2018). Frequentemente, enfrentamos períodos de escassez hídrica que impactam não apenas o abastecimento público, mas também a produção industrial, ressaltando a necessidade de práticas mais sustentáveis (SANTOS; SPOLADOR, 2022).

Diante deste cenário, a pesquisa e desenvolvimento de tecnologias que promovam a recuperação e reuso de água na indústria ganham destaque. Neste trabalho, investigou-se a aplicabilidade da atomização ultrassônica no tratamento e recuperação de água no processo de produção de açúcar. Esta tecnologia, caracterizada pela sua abordagem não química e baixo impacto ambiental, apresenta-se como uma alternativa promissora para a descontaminação e recuperação de água, mitigando a formação de subprodutos nocivos e reduzindo a pegada hídrica da indústria (AFONSO-MUNIOZGUREN *et al.*, 2021).

A indústria sucroalcooleira, impulsionada pela produção de açúcar e etanol, demanda um grande volume de água. Para minimizar o impacto ambiental e garantir a sustentabilidade, usinas implementam diversas tecnologias de recuperação e reuso da água, transformando um insumo crucial em um recurso cíclico. Nesse sentido, a extração do caldo da cana-de-açúcar, processo fundamental, também facilita a recuperação da água presente na cana. Por meio dos difusores utiliza-se água quente para extrair o suco, enquanto que as moendas esmagam a cana fisicamente; a água liberada nesses processos é coletada para etapas posteriores (GERALDO *et al.*, 2016).

Após a extração, o caldo rico em água passa por evaporadores multiestágios. Neles, a água evapora e é coletada separadamente, enquanto o caldo concentrado segue para outras etapas. Essa água evaporada, de alta qualidade, pode ser reutilizada em diversos processos (RACKEMANN *et al.*, 2022).

Segundo Peiter *et al.*, (2019), a vinhaça, subproduto da produção de etanol, contém água e outros compostos. Através da osmose reversa ou evaporação, essa

água é separada e purificada, podendo ser utilizada na irrigação ou outros processos industriais, minimizando o impacto ambiental desse ciclo produtivo.

Outra técnica para recuperar água é através do vapor gerado em diferentes etapas da produção, como na moenda e na evaporação do caldo. Esse vapor é condensado e transformado em água cuja qualidade é alta podendo ser reutilizada em processos que exigem um padrão de pureza mais elevado (CHAVEZ-RODRIGUEZ *et al.*, 2013; DI DONATO *et al.*, 2021). Técnicas de reutilização das águas residuais em cascata de um processo em outro (onde os requisitos de qualidade sejam menos rigorosos) também são utilizadas como estratégia de minimização do descarte dos recursos hídricos na usina.

Soluções avançadas combinam as tecnologias acima, criando sistemas integrados de gestão da água. Esse sistema otimiza a recuperação, reuso e tratamento da água, buscando a sustentabilidade e a eficiência operacional da usina (GARNIER *et al.*, 2023).

Ao implementar essas tecnologias, a indústria sucroalcooleira demonstra seu compromisso com a preservação ambiental e a gestão responsável dos recursos hídricos, garantindo a sustentabilidade do setor e a proteção dos recursos naturais que é uma demanda crescente do setor produtivo atual.

O objetivo deste estudo foi desenvolver e avaliar um sistema de recuperação de água do caldo de cana-de-açúcar utilizando a técnica de atomização com ondas de ultrassom (US) (NAIDU *et al.*, 2022) e recuperação da água utilizando humidificação e desumidificação. Para isso, como objetivos específicos procurou-se: Adaptar o protótipo de atomização de água de alimentação de caldeira para vaporização a frio do caldo de cana; caracterizar a composição físico-química do caldo de cana *in natura*; Aplicar a metodologia de superfície de resposta para avaliar e modelar estatisticamente o processo de recuperação ultrassônica de água do caldo; Comparar o caldo de cana residual com o caldo de cana *in natura* e; Comparar a água recuperada com águas de reuso para operações na usina. Com essas estratégias, buscou-se não apenas melhorar a eficiência da recuperação de água, mas também contribuir para um modelo de produção mais sustentável e economicamente viável na indústria sucroalcooleira. Esta pesquisa é fundamental para avançar no conhecimento e aplicação de tecnologias sustentáveis na indústria, oferecendo uma solução prática e eficiente para um dos maiores desafios ambientais da atualidade.

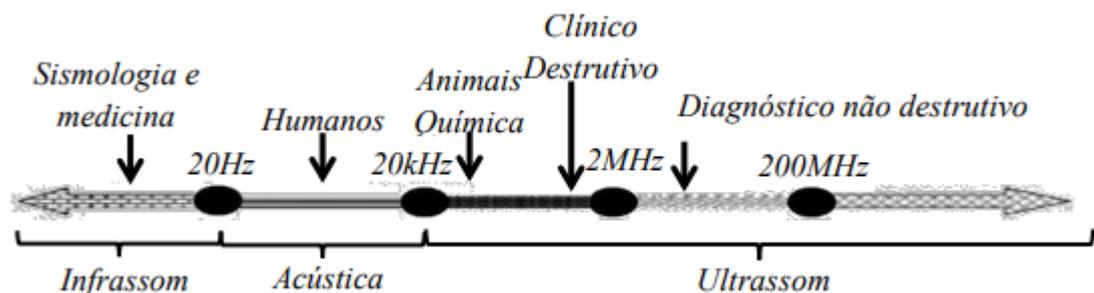
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1.1 Princípios do ultrassom

O ultrassom (US) pode ser definido como ondas mecânicas cujas frequências são mais elevadas do que a máxima frequência perceptível pelo ouvido humano, ou seja, 20 kHz como mostra a Figura 1. Essas ondas podem comportar-se de diversas maneiras e por esse fato podem ser utilizadas para várias finalidades, e seus efeitos são amplamente estudados (MANICKAM *et al.*, 2023).

Figura 1 - Espectros de onda sonora

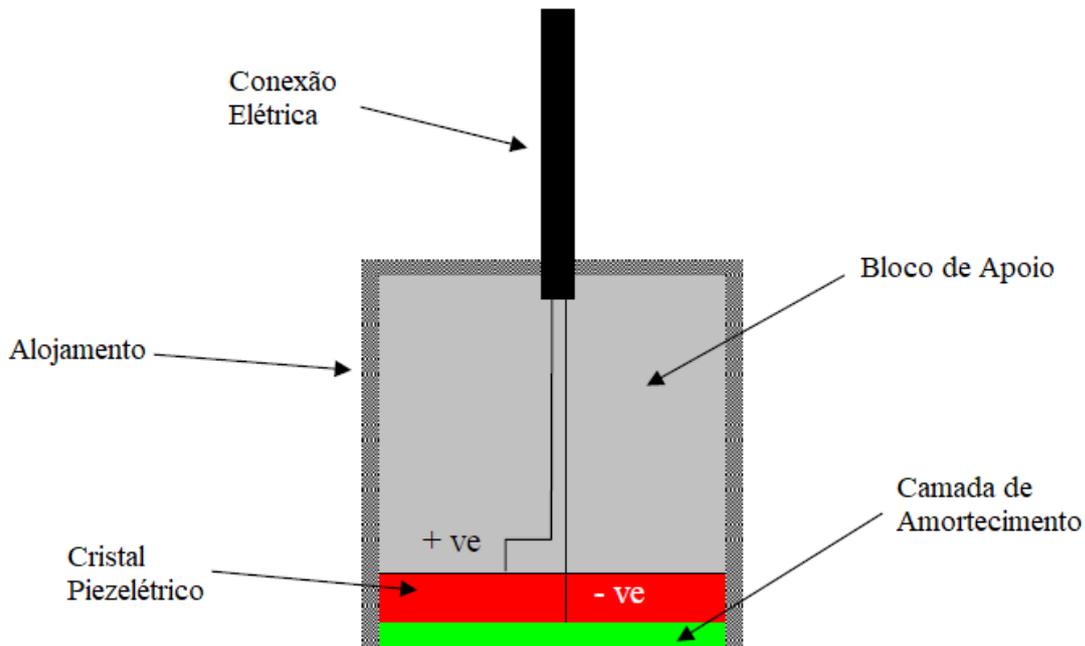


Fonte: Adaptado Pilli *et al.* (2011)

Essas ondas são geradas por dispositivos conhecidos como transdutores e se propagam em um meio material provocando a perturbação das moléculas desse sistema. Os transdutores ultrassônicos são compostos por materiais piezoelétricos. A palavra “Piezo” tem origem grega e remete a pressionar/comprimir. A piezoelectricidade, portanto, refere-se à geração de uma resposta elétrica devida à aplicação de uma pressão (AMORIM *et al.*, 2021). Os transdutores ultrassônicos são dispositivos responsáveis pela geração das ondas ultrassônicas. Esse equipamento faz parte do gerador de ultrassom de um sistema de aplicação de US e o seu funcionamento se dá pela conversão do sinal elétrico em energia acústica. Essa conversão é possível pois os transdutores são constituídos por materiais conhecidos pela sua característica piezoelétrica, ou seja, ao receber um sinal elétrico os cristais piezoelétricos apresentam a propriedade de contração e expansão sucessivas, gerando vibrações com frequências específicas, que variam de acordo com o sinal elétrico. Além de serem transmissores de ultrassom, os transdutores são receptores do sinal mecânico (SANIIE *et al.*, 2018).

Alguns fatores são importantes pois interferem no resultado esperado de uma aplicação de ultrassom dentre eles, dois parâmetros determinantes são: sensibilidade, ou seja, a capacidade do transdutor de detectar os sinais e resolução que consiste na capacidade de separar tipos de sinais distintos (CHEN, 2017). Na Figura 2 abaixo, observa-se uma configuração comum de um transdutor de US.

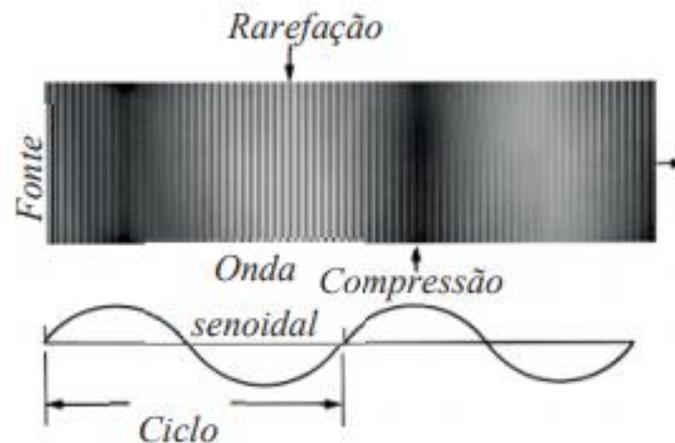
Figura 2 - Configuração de um transdutor de US



Fonte: Adaptado de Harvey, Gachagan, Mutasa (2014).

De acordo com Rahimi *et al.* (2014), 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 3). Na região onde a pressão é negativa ocorrerá a formação de microbolhas e esse processo denomina-se cavitação.

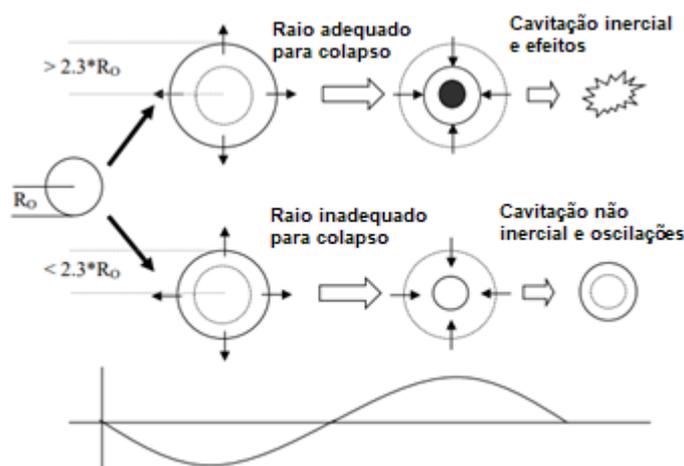
Figura 3 - Cavitação acústica



Fonte: Vajnhandl; Marechal, 2005.

O processo de cavitação acústica pode ser dividido em dois tipos: cavitação inercial e não inercial, como mostra a Figura 4. 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 (AL-JUBOORI *et al.*, 2016).

Figura 4 - Cavitação inercial (parte superior da figura) e não inercial (parte inferior da figura)

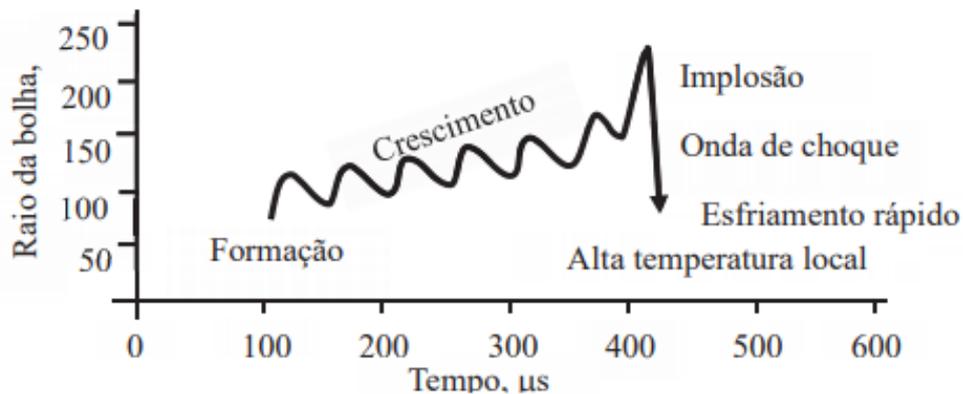


Fonte: Adaptado Harvey, Gachagan, Mutasa (2014).

Na Figura 5 pode-se observar um exemplo do ciclo de formação, crescimento e colapso de uma bolha durante o processo de cavitação. Esse fenômeno se destaca

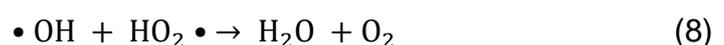
para processos de limpeza que utilizam ultrassom (PANG; ABDULLAH; BHATIA, 2011).

Figura 5 - Ciclo de uma bolha em um processo de cavitação inercial



Fonte: Adaptado 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, nos quais a onda de choque produzida em colapso irá criar enormes forças de cisalhamento (EGHBALI-ARANI *et al.*, 2018). As altas temperaturas e pressões favorecem um processo conhecido como sonólise. Esse fenômeno consiste na pirólise da água e posterior formação dos radicais H^+ e OH^- que são altamente reativos e desempenham um papel fundamental na sonoquímica. Segundo Hassani *et al.* (2022), a combinação desses radicais pode resultar na formação do peróxido de hidrogênio, como pode ser visto nas reações sequenciais a seguir:





2.1.2 Atomização ultrassônica

Atomização é o fenômeno pelo qual líquidos e outras substâncias são transformados em spray ou atmosfera gasosa através de um atomizador. Geralmente, para produzir a névoa de um líquido é necessário haver alta velocidade entre os fluidos circundantes (que pode ser o ar). Os atomizadores mais comuns são de bico de pressão, bico de dois fluidos, rotativo, etc. Nesse caso, o spray é formado devido ao aumento da energia cinética que ocorre através da pressurização do líquido. É possível controlar a partir desse método de geração, o tamanho das gotículas e a velocidade destas. Esse processo apesar de eficaz requer muita energia (SOVANI; SOJKA; LEFEBVRE, 2001).

A atomização tem grande importância em diversas aplicações industriais em áreas como por exemplo a agricultura, na indústria farmacêutica, meteorologia, medicina, dentre outros (MANICKAM *et al.*, 2023). Sua utilização tem sido empregada em aparelhos como difusores ultrassônicos, aromatizadores, nebulizadores médicos, injetores de combustíveis para motores ou queimadores, atomizadores de amostras líquidas para instrumentos analíticos e outras ferramentas.

A utilização de ultrassom para atomizar líquidos é uma forma de controlar a geração de gotas com diâmetro menor que 10 μm e reduzir o consumo de energia. Além disso, o transdutor de US utiliza apenas 10% da energia utilizada numa vaporização por calor gerado pela eletricidade, sendo uma tecnologia limpa, ou seja, que não gera resíduos químicos (NAIDU; KAHRAMAN; FENG, 2022). De acordo com a literatura, uma das aplicações que tem sido amplamente estudada é a utilização da atomização para separação de água e álcool. Porém esses estudos ficaram restritos à escala laboratorial com configurações de experimentos (metodologias) diversos e muitos apresentaram resultado inconsistente (SUZUKI, KIRPALANI, MCCRACKEN, 2006).

2.1.3 Parâmetros de atomização ultrassônica

O processo de atomização ultrassônica depende principalmente da frequência e intensidade das ondas ultrassônicas e das propriedades físicas do líquido em estudo. Durante o fenômeno da vaporização por US ocorre uma desintegração de uma folha líquida em pequenas gotas na forma de gás. Nesse processo, o sinal

elétrico é convertido em onda mecânica por meio do cristal piezoelétrico (NIKOLOV; WASAN, 2019). Essas ondas mecânicas se propagam no líquido como vibrações e, dessa forma, formam-se as bolhas. A uma baixa frequência (faixa de kHz) ocorre a cavitação acústica do líquido. Porém, em altas frequências (faixa de MHz) ocorre a atomização do líquido.

A atomização ultrassônica de líquidos é um processo que utiliza ondas sonoras de alta frequência para criar vibrações em um líquido, resultando na formação de gotículas finas ou névoa. Tudo começa com um transdutor ultrassônico, que converte energia elétrica em energia mecânica na forma de vibrações sonoras de alta frequência, geralmente acima de 20 kHz (20.000 ciclos por segundo). As ondas ultrassônicas são transmitidas para o líquido por meio de um elemento chamado “sonotrodo”, que é imerso no líquido ou colocado muito próximo à sua superfície do meio (SCHIEPPATI *et al.*, 2024). As vibrações ultrassônicas criam oscilações de pressão no líquido, levando à formação de pequenas bolhas ou cavidades durante as fases de baixa pressão. Quando essas bolhas atingem um tamanho crítico, elas colapsam violentamente durante as fases de alta pressão. Esse fenômeno é conhecido como cavitação acústica. O colapso das bolhas gera ondas de choque no líquido, que, juntamente com as forças de cisalhamento causadas pelas vibrações ultrassônicas, rompem a superfície do líquido. Isso resulta na ejeção de pequenas gotículas a partir da superfície. As gotículas formadas são extremamente finas e formam uma névoa ou aerossol. Este processo de atomização é altamente eficiente e pode ser controlado ajustando-se a frequência, amplitude das ondas ultrassônicas e a geometria do sonotrodo (AVVARU *et al.*, 2006).

A atomização ultrassônica permite um controle preciso sobre o tamanho das gotículas, o que é crucial em várias aplicações, como na dispersão de fragrâncias, em sistemas de refrigeração, na criação de revestimentos finos e uniformes e na tecnologia de entrega de medicamentos. A atomização ultrassônica é valorizada por sua eficiência, capacidade de produzir gotículas de tamanho muito uniforme e pela possibilidade de operar em temperaturas mais baixas em comparação com os métodos tradicionais de atomização, tornando-a ideal para líquidos sensíveis ao calor (ZHANG; YUAN; WANG, 2021).

2.1.4 O processo produtivo da Indústria sucroalcooleira e a água

Para entender o funcionamento de uma usina de açúcar e álcool, precisa-se analisar o processo produtivo em todas as suas etapas. Esse processo de produção divide-se em duas etapas principais: fase agrícola e fase industrial (CONTRERAS *et al.*, 2009). A fase agrícola consiste na preparação da cana de açúcar para sua utilização na fase industrial, ou seja, engloba toda parte de preparo de solo, plantio e cultivo. Em seguida, tem-se a atividade de irrigação que é uma técnica utilizada para compensar longos períodos de seca e que melhora o desempenho do plantio. Ainda nessa fase, acontecem as atividades de colher, carregar e transportar a cana de açúcar até a usina.

Ao chegar na unidade de processamento, inicia-se a fase industrial nas balanças, onde são pesadas as quantidades de cana que chegam, além disso, são retiradas amostras para posterior análise de parâmetros comerciais como SST, conteúdo de fibras, pureza, etc. Depois de pesada e colhidas as amostras, a cana é direcionada, conforme demanda, para o estoque ou para a mesa alimentadora por meio do maquinário (MELO, 2015).

Na alimentação, é feita a lavagem das canas para retirar sujidades que aderem sua superfície. O efluente contaminado segue para ser tratado, onde uma parte das impurezas são retidas em peneiras e as demais passam por processo de decantação. Após essa etapa, o fluido tratado pode ser reaproveitado para retornar à atividade de limpeza da matéria prima, enquanto o lodo é levado ao descarte ou para ser utilizado no campo. Posteriormente, acontece o transporte, por meio de esteiras, da cana aos picadores e desfibradores, onde é fracionada e desfibrada a fim de permitir que seja extraído, de maneira eficiente, seu suco na moenda ou no difusor (GAL *et al.*, 2009). Depois dessa preparação, a cana segue para a moenda por uma esteira, onde passa por um eletroímã que garante que a matéria-prima não contenha metais particulados. Assim, dá-se início ao processo de moagem, onde através de um equipamento composto por rolos faz-se a separação do caldo e do bagaço no momento em que a cana segmentada e desfibrada passa por eles. Nesse processo, parte do bagaço vai junto com o caldo, então após peneiramento esse resíduo é retirado e volta para a moenda.

O resíduo (bagaço) da moagem e extração do caldo é encaminhado às caldeiras, onde é utilizado para geração de vapor através de sua queima (ANUKAM *et al.*, 2016). O remanescente é depositado em ambiente limpo e arejado para que

após a secagem, esse material seja reaproveitado no processo ou seja vendido, conforme a demanda do estoque que é organizado estrategicamente para que não seja necessário comprar combustível externo. A energia elétrica que é utilizada para realização de atividades do cronograma de produção de açúcar, álcool e a auto geração de energia, é produzida pelas turbinas que movimentam máquinas e geradores. Além disso, o vapor que escapa das turbinas é reutilizado em procedimentos como evaporação do caldo e cozimento do açúcar, por exemplo (ENSINAS *et al.*, 2007).

Assim, o caldo da cana-de-açúcar que é extraído na moenda segue para o fabrico do açúcar e/ou para destilaria, de acordo com a demanda e necessidade da usina. Quando direcionado para fabricar o açúcar, o caldo é previamente aquecido e segue para o próximo passo onde adiciona-se leite de cal, neutralizando o meio; essa reação química permite a eliminação de impurezas existentes no caldo. Em seguida, o substrato passa por aquecimento em trocadores de calor até atingir uma temperatura de 105°C (ABDEL-ALEEM, 2020). Na fase seguinte, o caldo da cana passa por um balão de *flash* a fim de eliminar vapores inerentes ao processo de aquecimento e segue para retirada de impurezas por decantação. O lodo na forma de torta de filtro, que é o subproduto resultante, é reutilizado como adubo para o plantio após passar por tratamento de filtração e prensamento para retirada da água.

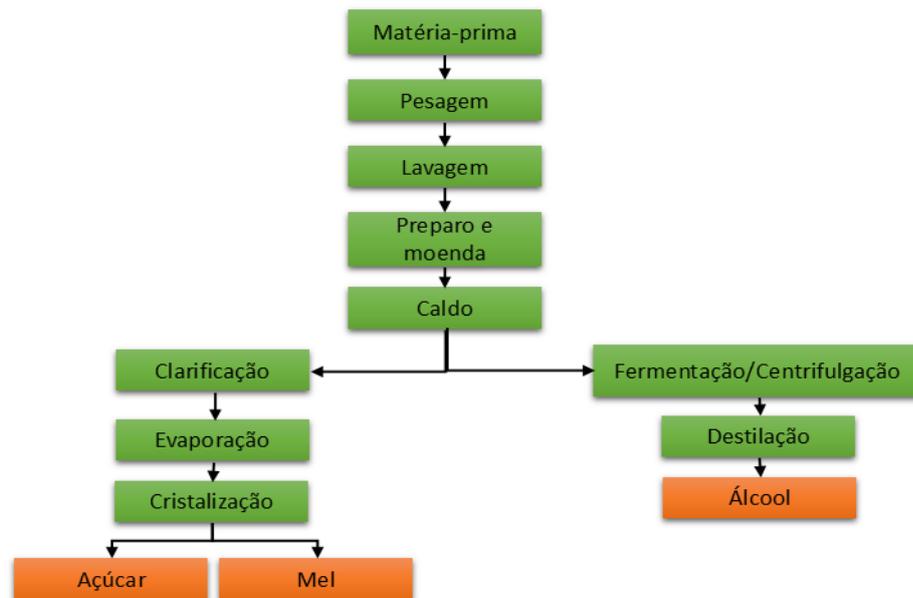
Após o processo de clarificação (passagem do caldo pelos decantadores), o caldo é concentrado por meio dos evaporadores em uma pré-evaporação, onde é retirado cerca de 35% da água. A evaporação para concentração do caldo é considerada completa com três, quatro ou cinco estágios de um sistema de evaporadores ligados em série visando a produção de um xarope que pode variar entre 55 a 65 SST (CAVALCANTE; ALBUQUERQUE, 2015). Em seguida, esse caldo altamente concentrado é levado para flotas, onde são retiradas as impurezas para seguir para o cozimento. Nos cozedores, acontece a formação do cristal de açúcar comercializado a partir de grandes aglomerados chamados de sementes de açúcar. O cozimento desenvolve-se em dois ou três estágios ou massas e isso pode variar de uma usina para outra. Os cristais formados durante esse processo ainda não estão totalmente na sua forma comercial, alguns deles estão cobertos por mel (COSTA *et al.*, 2018). Com o objetivo de realizar a separação entre o açúcar e o mel, os cristais são levados aos cristalizadores que são centrifugas que proporcionam a constituição final dos cristais. Posteriormente, o açúcar é transportado por esteiras para os

equipamentos de resfriamento e secagem e, em seguida, para ser embalado e armazenado.

O mel que é um subproduto do processo produtivo de açúcar segue para a produção do álcool na destilaria ou pode ser vendido para outras usinas produtoras de álcool (MOREIRA; GOLDEMBERG, 1999). Para a produção de álcool, primeiramente ocorre o preparo do mosto a partir da junção de caldo, xarope, mel e água. Esse mix é produzido conforme as regras e especificações da usina produtora de maneira a permitir condições ótimas para realização da produção. O mosto é direcionado a fermentação misturando-o com as leveduras, que são os microrganismos responsáveis pela fermentação. Após um período de cerca de sete horas a mistura contém 6 e 10% de álcool formando um vinho levedurado. O material é centrifugado para separar o vinho do fermento (leveduras). Esses sólidos retirados são parte reaproveitados após tratamento e parte pode servir de substrato para fabricação de rações para animais (GRAMINHA *et al.*, 2008).

A partir do vinho obtido pela fermentação do mosto, são fabricados 5 produtos: cachaça, álcool hidratado, álcool anidro, óleo fúsel e vinhaça. Os três primeiros são os principais, porém o último pode ser reaproveitado como fertilizante para o plantio de cana e o óleo fúsel é vendido como matéria prima para outras indústrias. Para ilustrar de forma sintetizada o processo produtivo de açúcar, álcool, melaço e demais subprodutos de uma usina, a partir da Figura 6, é possível ter uma visão geral das atividades de uma planta industrial, desde a recepção até a embalagem. Dentro visão macro dos processos, é possível visualizar ainda algumas atividades que não estão ligadas diretamente ao sistema produtivo, como tratamento de água.

Figura 6 – Fluxograma do processo produtivo de açúcar, álcool e melado



Fonte: Paiva; Morabito, 2007. (Adaptado)

Para este estudo, analisaremos prioritariamente a etapa da evaporação. Nessa fase, o caldo da cana de açúcar será concentrado, para posteriormente ser cristalizado (PAIVA; MORABITO, 2007). Esse tratamento permite que o caldo, que é composto de grande quantidade de água, aumente o seu SST (porcentagem em massa de sólidos dissolvidos em água).

A indústria açucareira possui grande valor agregado para o mercado e cultura do país. Esse seguimento do setor agrícola teve um crescimento relevante ao longo dos anos. Porém, algo que permanece válido até a atualidade é a alta necessidade de água no processo produtivo da usina de cana de açúcar, apesar das atualizações que foram feitas ao longo dos anos. Entre as etapas do processo que mais precisam desse recurso natural estão: resfriamento de condensadores, produção de vácuo em colunas barométricas, resfriamento de dornas, lavagem de esteiras, outras águas de resfriamento e outros usos (PALACIOS-BERECHÉ *et al.*, 2022). De acordo com a ANA (2009), a estimativa de uso de água no processo produtivo das usinas era de cerca de 20 m³/t de cana-de-açúcar. A necessidade da preservação desse recurso, bem como a pressão social para esse fim corroborou para que diversos estudos fossem desenvolvidos, no intuito de otimizar a utilização dessa riqueza natural. Uma das técnicas que tem sido estudadas consiste no aperfeiçoamento dos circuitos e circulação da água no processo industrial.

A água que era utilizada nos condensadores que era destinada diretamente a esse sistema passou a vir das dornas. E dessa forma, houve uma redução na quantidade de água necessária de aproximadamente 16%. Com o circuito de circulação funcionando de forma fechada, com um processo de resfriamento evaporativo-torres de resfriamento, a utilização de água concentrou-se na reposição do efluente perdido por evaporação e arraste equivalente a cerca de 2 a 5% do total em circulação (GONÇALVES FILHO *et al.*, 2018). O processo de lavagem da cana de açúcar que, tem como objetivo a retirada de detritos advindos das operações anteriores (corte, transporte, etc.), utiliza um grande volume de água. Em média, usa-se 6 mil litros de água para cada tonelada de cana. Esse efluente, posteriormente, passa por um processo de retirada dos resíduos sólidos, em geral, de forma mecânica, além de passar por um processo de decantação. Após essa etapa, pode ser utilizada na fertirrigação da lavoura em conjunto com a vinhaça (RULLI; VILLEGAS; COLIN, 2020). O caldo clarificado é composto em grande quantidade de água, sacarose e outras substâncias. Para formação dos cristais da sacarose é necessário a remoção da água. Esse processo é feito, em geral, por evaporadores à vapor em duas fases: pré-evaporação e evaporação.

2.1.5 Propriedades do caldo da cana-de-açúcar

A cana de açúcar, pertencente ao gênero *saccharum*, teve origem no continente asiático, nas proximidades da Indonésia (EMBRAPA, 2019). Estima-se que esta planta foi introduzida no Brasil no período colonial, em meados de 1532. Seu sucesso produtivo se deu à sua fácil adaptação ao clima e solo brasileiro e, dessa forma, o país ganhou destaque no cenário mundial como um dos maiores produtores de cana de açúcar. Embora tenha enfrentado diversas crises no setor, a posição de destaque se perpetuou até os dias atuais. Esse fato contribuiu para que, durante esses anos, o setor produtivo expandisse as áreas de atuação e uma diversidade de produtos gerados a partir da cana de açúcar foram surgindo (EMBRAPA, 2020).

Em 2019 a produção brasileira de cana-de-açúcar foi de aproximadamente 752,89 milhões de toneladas, fato que caracterizou essa cultura como uma das principais atividades econômicas do Brasil (CARRER *et al.*, 2022). Este cultivo pode ser utilizado como matéria prima na produção produtos diversos. Um deles é o etanol, cuja produção anual é de 33,1 bilhões de litros. Em seguida, o açúcar com cerca de 29 milhões de toneladas por ano e outros. O caldo de cana tem grande aceitabilidade

no Brasil, devido a suas características e, dessa forma, tem alto potencial de exploração para a economia do país (GEREMIAS-ANDRADE *et al.*, 2020).

O líquido oriundo da moagem da cana de açúcar, popularmente chamado de caldo ou garapa pelos brasileiros, é uma bebida que fornece energia (devido à composição) e não contém álcool, e ao longo dos anos sua popularidade ganhou o país principalmente nas regiões e estações do ano com temperaturas mais elevadas. (MUKHTAR *et al.*, 2022). Esse substrato é extraído em prensas e rolos elétrico que moem a cana e posteriormente seu consumo é feito puro com gelo e até mesmo com a adição de suco de algumas frutas ácidas como o limão, por exemplo. O caldo de cana tem como características aparentes leve viscosidade e coloração variando entre verde e castanho escuros. Como é obtido de uma planta sua constituição pode variar de acordo com o tipo da cana, tempo de amadurecimento, clima, solo, dentre outros fatores; porém a bebida mantém os componentes nutricionais de sua origem.

De acordo com Bhukya (2021), quantitativamente o caldo de cana é composto por água (75% - 85%), açúcares não redutores (10–21%), açúcares redutores (0,3–3%), substâncias orgânicas (0,5–1%), substâncias inorgânicas (0,2–0,6%) e nitrogênio (0,5–1%). Dessas substâncias pode-se destacar sacarose, glicose e frutose no grupo dos açúcares; proteínas, lipídios e ácidos nos elementos orgânicos; e as substâncias inorgânicas, representados pelas cinzas. Os valores da análise físico-química do caldo de cana de açúcar plantada na região sudeste do Brasil podem ser vistos na Tabela 1. Para os parâmetros de cor no sistema CIE Lab (REZZADORI *et al.*, 2014), tem-se L para luminosidade, variando de 0 (preto) a 100 (branco); b para coordenadas de cor vermelho/verde, medindo a intensidade da cor vermelha (+) ou verde (-); a para coordenadas de cor amarelo/azul, medindo a intensidade da cor amarela (+) ou azul (-).

Tabela 1 – Caracterização do caldo da cana-de-açúcar

Parâmetro	Caldo de cana <i>in natura</i>
Proteínas (g/100 mL)	0,26 ^a ± 0,01
Lipídios (g/100 mL)	<0,10 ^a ± 0,01
Carboidratos (g/100 mL)	19,95 ^a ± 0,08
Umidade (g/100 mL)	79,47 ^a ± 0,08
Açúcares não redutores (g/100 mL)	14,29 ^a ± 0,06
Cinzas (g/100 mL)	0,33 ^a ± 0,01
Valor Calorífico Total (Kcal/100 mL)	80,82 ^a ± 0,11
Sólidos Totais (g/100 mL)	21,54 ^a ± 0,01
Sólidos Solúveis (g/100 mL)	19,35 ^a ± 0,49
pH	5,43 ^a ± 0,03
Acidez (mg Ácido Cítrico /100 mL)	0,024 ^a ± 0,01
Vitamina C (mg de vit. C/100 mL)	5,54 ^a ± 0,11
Parâmetro de cor	Caldo de cana + maracujá
L*	22,48 ^a ± 0,84
a*	-2,71 ^b ± 0,13
b*	11,55 ^a ± 0,51

Fonte: Adaptado Rezzadori *et al.* (2014).

Devido a sua constituição de nutrientes, umidade elevada e pH de cerca de 5,0 em condições ambiente, o caldo da cana de açúcar é uma substância que fornece condições ao crescimento e desenvolvimento de diversos microrganismos. Alguns desses seres microscópicos que se associam a esse substrato estão presentes no ambiente onde a cana foi plantada (solo, ar, vegetação), são alguns deles: bactérias, leveduras e fungos filamentosos (OLIVEIRA *et al.*, 2007). O caldo possui ainda algumas características particulares como a cor devido a presença de clorofila, que tem caráter determinante na aceitação do produto. Além disso, a garapa após extraída da cana é suscetível à reação de Maillard, em que açúcares redutores e aminoácidos de sua composição formam melanoidinas que proporcionam uma cor escura ao caldo (coloração castanha).

2.1.6 Humidificação-Desumidificação

A separação sólido-líquido por Umidificação–Desumidificação (HDH) é uma tecnologia promissora e segura, adequada para fontes de energia de baixa qualidade, como calor solar de baixa temperatura ou energias residuais. Este método tem várias vantagens, como operar com energia térmica de baixa qualidade, pressão constante e baixos custos operacionais, tornando-o adequado para recuperação de água para

reuso em áreas rurais remotas (SANTOS; TAVIEIRA, 2022). O conceito do sistema HDH consiste em dois passos: 1. Um fluido (ar ambiente) passa por um duto onde a água é pulverizada ou aspergida, saturando o ar (processo de umidificação). 2. O vapor de água retido pelo fluido saturado é condensado (processo de desumidificação), produzindo água para reuso.

Em relação ao processo de umidificação, existem dois métodos comumente usados na literatura. O primeiro utiliza um umidificador de almofada, com uma estrutura de favo de mel onde a água salina é pulverizada e atomizada. No segundo, a água salina é atomizada usando pulverizadores de água. Quanto ao primeiro método, há vários estudos que variaram o material do umidificador de almofada. Zamen *et al.* (2014) avaliaram o número ótimo de estágios no processo HDH, usando um umidificador de leito empacotado de polipropileno. O processo de dois estágios melhorou o uso específico de energia, eficiência e produção diária por área do coletor, além dos custos de investimento, sendo cerca de 20% mais eficiente que o de estágio único. Kabeel e Said (2014) estudaram experimentalmente um sistema híbrido de dessalinização solar baseado em HDH. O umidificador de almofada consistia em anéis de PVC, alcançando máxima eficiência de umidificação de 98% ao meio-dia em um dia ensolarado, com produção máxima de 45 L/dia. Hamed *et al.* (2015) estudaram matemática e experimentalmente um sistema de dessalinização HDH aquecido por água solar, usando um umidificador de almofada de papel celulósico, com produtividade média de 22 L/dia. Outras investigações estudaram esse processo usando uma bomba de calor de compressão de vapor mecânica (YUAN; ZHANG; ZHANG, 2005), aumentando a produtividade para até 60 L/dia. Finalmente, Xu *et al.* (2020) aprimoraram um sistema de dessalinização de água com uma almofada de celulose, usando calor residual do condensador de arrefecimento, alcançando eficácia máxima de umidificação de 65% e produtividade de 129 kg/dia.

Em relação ao segundo método, umidificadores de spray, também há vários estudos. Yanniotis e Xerodemas (2003) investigaram experimentalmente dois tipos de umidificadores de ar por spray e almofada em diferentes condições operacionais. Demonstraram que um eliminador de gotas de água é necessário no umidificador de spray. Kang *et al.* (2014) avaliaram o desempenho de um sistema de dessalinização multi-efeito baseado em umidificação-desumidificação, visando aproveitar o calor latente de condensação e o calor residual na salmoura para reutilizá-lo. O GOR

(rendimento ganho) máximo foi de 2,44 e a produção de água doce de 72,6 kg/h. Hawlader *et al.* (2004) estudaram experimentalmente um sistema HDH com uma bomba de calor assistida por energia solar modificada, mostrando que quanto maior o trabalho do compressor e a temperatura da água de entrada maior coeficiente de desempenho do sistema.

2.1.7 Qualidades de água para demandas da usina

O reuso de água na indústria sucroalcooleira, originária de diferentes fontes internas de água, como condensados e purgas, deve ser analisado de acordo com seus diferentes usos após tratamento (CHAVEZ-RODRIGUEZ *et al.*, 2013):

- O uso de vapor dentro da usina exige um tratamento mais avançado para a água de alimentação nas caldeiras, devido à tendência de utilizar equipamentos de maior pressão para produzir maiores excedentes de energia elétrica, fazendo que tecnologias mais avançadas como a de osmose reversa sejam utilizadas para estes fins;
- A água de embebição, com temperaturas entre 85 e 95°C, é eficaz para a extração de açúcares sem extração excessiva de cera;
- A lavagem de cana tende a diminuir devido ao aumento da colheita mecânica, com a água de lavagem sendo menos crítica em termos de qualidade, mas importante para evitar corrosão e contaminação;
- A água de diluição de fermento deve ser limpa e fria destacando o impacto negativo dos condensados na fermentação;
- A água para outros processos, como preparo de leite de cal e lavagem de gases, também requer tratamentos específicos para evitar problemas como corrosão e obstruções.

A qualidade da água é crucial em várias etapas do processo para manter a eficiência e evitar problemas técnicos. A Tabela 2 resume as características físico-químicas que correntes de água de reuso devem ter para alimentação de caldeiras nas usinas de açúcar e álcool, como uma aplicação mais nobre em relação à qualidade do reuso.

Tabela 2 – Características físico-químicas de alguns tipos de águas de alimentação de caldeiras para reuso nas usinas de açúcar e álcool

Parâmetros	Valores limite							
Pressões (kgf/cm ²)	0 -21,1	21,1 - 31,6	31,6 - 42,2	42,2 - 52,7	52,7 - 63,3	63,3 - 70,3	70,3 - 105,5	105,5 - 140,6
Qualidade da água de alimentação								
OD (mg/L)	<0,007							
Ferro total (mg/L)	≤ 0,1	≤ 0,05	≤ 0,03	≤ 0,025	≤ 0,02		≤ 0,01	
Cobre total (mg/L)	≤ 0,05	≤ 0,025	≤ 0,02		≤ 0,015	≤ 0,01		
Dureza total (mg/L)	≤ 0,3		≤ 0,2		≤ 0,1	≤ 0,05	0	
pH (a 25°C)	8,3 - 10					8,8 - 9,6		
COT (mg/L)	< 1		< 0,5			< 0,2		
OG (mg/L)	< 1		< 0,5			< 0,2		
Qualidade da água da caldeira								
Sílica (mg/L)	≤ 150	≤ 90	≤ 40	≤ 30	≤ 20	≤ 8	≤ 2	≤ 1
Alcalinidade total (mg/L)	≤ 350	≤ 300	≤ 250	≤ 200	≤ 150	≤ 100	NE	NE
Condutividade (µS/cm)	5400 - 1100	4600 - 900	3800 - 800	1500 - 300	1200 - 200	1000 - 200	≤ 150	≤ 80
STD (mg/L) – obtido pela condutividade	4320 - 880	3680 - 630	3040 - 560	1200 - 210	960 - 140	700 - 140	≤ 105	≤ 48

Fonte: Adaptado ANA (2009).

2.1.8 Planejamento experimental

Uma forma eficiente e econômica de analisar dados que estão relacionados com diversos parâmetros tem sido utilizando ferramentas estatísticas. Uma dentre as metodologias amplamente utilizadas é o planejamento de experimentos que baseia-se em um conjunto de técnicas estatísticas utilizadas para planejamento, execução, avaliação e interpretação de experimentos dirigidos, com a finalidade de definir valores e dados relevantes a serem estudados (SMUCKER *et al.*, 2023). De maneira geral, essa técnica consiste na variação dos parâmetros (variáveis), de acordo com diferentes níveis pré-estabelecidos, a cada experimento de maneira organizada. Assim, pesquisador pode avaliar a redução do tempo e despesas do projeto por

reduzir a quantidade de experimentos por variável e sem precisar reduzir a quantidade de parâmetros estudados. Juntamente com os dados experimentais executados e *softwares* é possível facilmente obter o modelo matemático dos ensaios pelo planejamento experimental.

Um planejamento experimental fatorial verifica uma possível relação entre os parâmetros estudados e a influência destes nos efeitos na(s) resposta(s). Considerando-se um número de variáveis k combinadas em dois níveis, o planejamento fatorial é formado de 2^k experimentos. Em geral, atribui-se os níveis aos parâmetros com valores numéricos (quantitativos) podendo diferenci-los a partir dos sinais de + (mais) no nível mais elevado e – (menos) no nível mais baixo, todavia o impacto dos sinais com o efeito nas respostas é o mais relevante para a análise posterior (ELARBE *et al.*, 2022). É possível ainda fazer estudos de parâmetros qualitativos, e dessa forma, o estudante que desenvolve a pesquisa escolhe quais os nomes dos sinais. Os sinais dos efeitos das interações entre as variáveis a partir da segunda ordem é obtido a por meio da multiplicação entre os sinais dos parâmetros de estudo, levando-se em consideração todas as combinações. Dessa maneira, é elaborada a matriz de coeficientes formada por colunas de sinais dos efeitos principais e de sinais da combinação dos efeitos de interação.

Um planejamento experimental fatorial completo é constituído por uma grande quantidade de ensaios (2^k) no estudo, o que pode ser um ponto negativo considerando questões como tempo e custo. Experimentos que possuem mais de 4 fatores ($k > 4$), por exemplo apresentam uma quantidade de efeitos não significativos que pode ser desconsiderados no planejamento, não sendo necessário estima-los. Assim, pode-se estudar os efeitos mais relevantes e obter uma análise semelhante à observada quando executado um fatorial completo com uma quantidade menor de ensaios, tem-se então, os planejamentos fatoriais fracionários (CONTO LÓPEZ; CORREA ESPINAL; ÚSUGA MANCO, 2023). Segundo a literatura, existem diversos tipos de planejamento fatorial fracionário e eles podem ser descritos pela expressão 2^{k-b} , sendo k a quantidade de parâmetros e b a fração ($\frac{1}{2}$, $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{8}$, $\frac{1}{16}$, etc.). Além disso, o valor da fração impacta diretamente na quantidade de efeitos calculados bem como na quantidade de ensaios do experimento. De acordo com a fração escolhida, o estudante pode conseguir tipos de dados: apenas os efeitos principais das variáveis

e os que contém ensaios que separem e estimem efeitos de interações entre variáveis (considerando que essas interações influenciam as respostas).

Box e Wilson (1951) definiram e os planejamentos compostos centrais (CCD) como um planejamento mais evoluído e otimizado em comparação à estudos que precisavam de uma grande quantidade de ensaios para poucas variáveis incluindo os planejamentos fracionários. Considerando-se rotabilidade, blocagem ortogonal, baixa quantidade de experimentos como algumas das características que podem ser alcançadas através de um CCD devido as etapas:

- Avaliação de dois níveis tanto para um planejamento fatorial completo como para um fracionário, dependendo das necessidades;
- Execução de ensaios no ponto central ($x_i = 0, \forall i$) e nos pontos axiais ($x_i = \pm \alpha$, sendo $x_j \neq x_i$ e $\alpha = \sqrt[4]{2^k}$), estes últimos sendo distribuídos nos eixos por coordenadas.

O primeiro passo para elaboração de um planejamento CCD é determinar o número de fatores (k) do experimento, em seguida define-se o tipo de planejamento fatorial (fracionário ou completo) e o número de ensaios no ponto central ($2k$). A quantidade de ensaios é descrito por $2^k + 2k + n$, sendo n a quantidade de pontos centrais ($n \geq 4$) (JULIOUS, 2005).

2.2 ESTADO DA ARTE

A atomização ultrassônica, um fenômeno onde um líquido em forma de filme fino se desintegra em gotículas ao fluir sobre uma superfície vibratória de alta frequência (>20 kHz), é explicada por duas teorias principais: a hipótese da onda capilar e a hipótese da cavitação. A hipótese da onda capilar, baseada na instabilidade de Taylor (TOPP; EISENKLAM, 1972), relaciona o tamanho médio das gotículas com o comprimento de onda capilar, enquanto Lang observou as perturbações da superfície para apoiar esta teoria (RAJAN; PANDIT, 2001). Por outro lado, a hipótese da cavitação, aplicável a sistemas de alta frequência (16 kHz–2 MHz) e energia, propõe que bolhas de cavitação formadas no filme líquido geram choques hidráulicos intensos que desintegram o líquido e ejetam gotículas (AVVARU *et al.*, 2006).

Na atomização por ultrassom, uma camada líquida é mantida sobre um disco piezoelétrico, e as vibrações mecânicas geradas desintegram o líquido em finas gotículas. A cavitação acústica ocorre em baixas frequências, enquanto altas frequências induzem a atomização diretamente na interface gás-líquido. Esse método é usado em uma variedade de dispositivos, incluindo umidificadores, nebulizadores médicos e atomizadores para instrumentos analíticos (NII *et al.*, 2006). Nos últimos vinte anos, estudos foram realizados sobre a aplicação de névoa ultrassônica para a separação de soluções aquosas em escala laboratorial, com resultados variados.

Diferentes de atomizadores convencionais, que não controlam o tamanho das gotículas e têm alta demanda energética, a atomização por ultrassom permite a produção de gotículas com menos de 10 µm de diâmetro, distribuição de tamanho estreita e menor consumo de energia. Este processo é influenciado pela frequência, intensidade do US e propriedades do líquido, consumindo apenas 10% da energia necessária para vaporização por aquecimento (KOBARA *et al.*, 2009). O US com frequências entre 20 kHz e 5 MHz, é diferenciado das ondas sonoras comuns pela sua propagação direcional e não afeta a energia interna das moléculas (SANCHETI; GOGATE, 2017). Ao invés disso, causa efeitos físicos e químicos, como cavitação acústica, sendo aplicado em operações unitárias (extração, cristalização, destilação, etc.) para melhorar a eficiência energética, flexibilidade operacional e reduzir custos. Contudo, a escala dos processos assistidos por ultrassom é limitada pela capacidade de fabricação de hardware ultrassônico. Além de aplicações tradicionais, o US é

usado em atomização, definida como a transformação de líquido em sprays ou névoas.

O ultrassom é reconhecido como um dos métodos ecológicos mais eficazes para recuperar água associada a compostos orgânicos e reduzindo a necessidade de reagentes químicos para a dessalinização (TOURAB *et al.*, 2020). Comparativamente a outros processos, a eficiência do ultrassom pode até melhorar em presença de sólidos suspensos (MAHVI, 2009; MASON & LORIMER, 2002). Estudos têm explorado seu uso na purificação de água, incluindo a redução de turbidez, controle de algas, desativação de microrganismos e remoção de dureza (CHOONG; NASIP, 2021). No campo da dessalinização, o ultrassom oferece vantagens como melhor desempenho, ausência de poluição secundária e portabilidade, especialmente em comparação com métodos como de Osmose Reversa (BRANDÃO *et al.*, 2022).

Xiao (2010) investigou o uso do ultrassom na dessalinização térmica, observando um aumento na taxa de evaporação da água salina, e Zhang, Dong e Wang (2011) estudaram a influência do ultrassom na evaporação da água salina. Enquanto a maioria dos estudos combina ultrassom com outros sistemas de dessalinização, esta pesquisa se concentrou especificamente nos efeitos do ultrassom na evaporação. Os referidos autores também identificaram a necessidade de melhorias nos processos de umidificação-desumidificação para utilização na separação sólido-líquido, sugerindo a tecnologia de atomizador ultrassônico como uma opção promissora. A aplicação desta tecnologia em processos de dessalinização por HDH ainda é pouco explorada, exigindo mais pesquisas, particularmente na avaliação de sua eficácia na atomização da água e o impacto da salinidade da água de alimentação na produção de água para reuso.

É de grande importância o papel das indústrias química e de processamento (IQP) na transformação de recursos em produtos desejados, como químicos, farmacêuticos, energia, alimentos e combustíveis. A intensificação de processos (IP) integra várias etapas de processamento e utiliza fontes de energia alternativas, como ultrassom (US), micro-ondas, campos centrífugos e elétricos, visando processos mais eficientes, limpos e econômicos (YAO; PAN; LIU, 2020). O ultrassom tem sido classificado como uma das poucas tecnologias a integrar a área denominada de “Engenharia Verde”, uma vez que sua aplicação requer apenas temperaturas e

pressão ambientes, e não gera a emissão de gases de efeito estufa (GEE). Dessa forma, sua aplicação dentro da IP, e neste caso, mais especificamente dentro de indústrias sucroalcooleira, tem sido indicada para novas funções como: separação etanol-água via atomização ultrassônica (NII *et al.*, 2006), controle de incrustações em trocadores e evaporadores (HU; ZHENG; QIU, 2006), efeito das ondas ultrassônicas sobre o pH do caldo (BHAPKAR; GHATULE; BHAPKAR, 2018), manutenção da qualidade e estabilidade do caldo durante a estocagem (ZIA *et al.*, 2019), tratamento não térmico para conservação do caldo de cana (MANZLOOR *et al.*, 2020), tratamento de água de caldeira (BRANDÃO *et al.*, 2022). A estabilização do caldo de cana-de-açúcar utiliza frequências de, no máximo, 100 kHz. Por outro lado, a vaporização ultrassônica opera com frequências acima de 1 MHz. Dessa forma, necessita-se de um trabalho para a aplicação de ondas ultrassônicas na recuperação da água do caldo de cana que, além de mostrar tais possibilidades de reuso para a água, também confirme a conservação das propriedades do caldo de cana-de-açúcar remanescente deste tratamento.

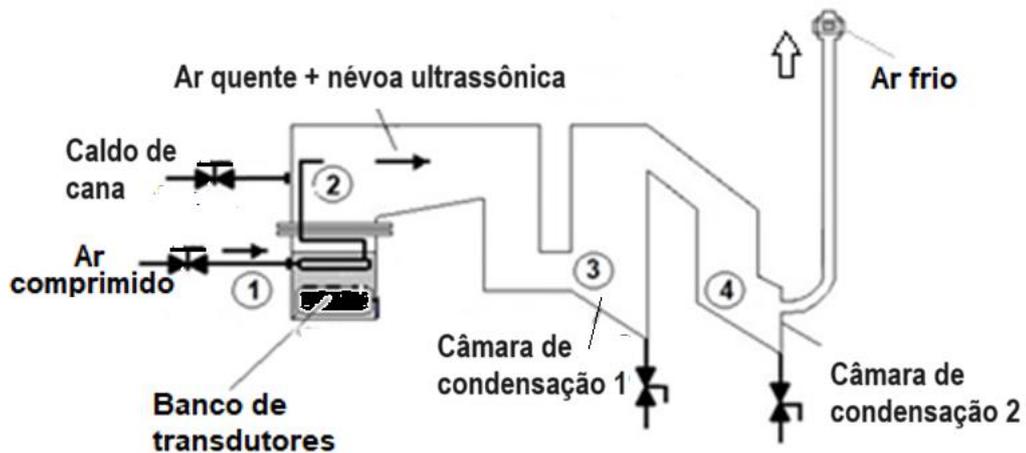
3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 ARRANJO EXPERIMENTAL

Neste trabalho, será utilizado efluente oriundo do processo sucroalcooleiro e um equipamento conforme a Figura 7 para realização da evaporação utilizando ultrassom. O equipamento foi desenvolvido para realizar testes experimentais de vaporização a frio de líquidos. Construído em chapa de 3 mm de espessura de aço inoxidável AISI 314, o protótipo possui uma câmara de ultrassonicação, uma câmara de mistura, duas câmaras de condensação, um duto de descarga de ar frio, uma serpentina para aquecimento de ar de arraste e um *cooler* instalado no topo da última câmara de condensação; cujo efeito também resfria a câmara de condensação anterior. O líquido a ser atomizado, neste caso o caldo de cana-de-açúcar, entra continuamente na câmara de ultrassonicação, fazendo contato com transdutores ultrassônicos (1). Para vaporização do caldo promove-se uma atomização com auxílio de um banco de transdutores ultrassônicos, constituído de 6 pastilhas transdutoras de cerâmica piezoelétrica que funcionam à frequência fixa de 1,7 MHz. Cada transdutor tem capacidade de vaporização de 0,5 kg/h de água. Uma serpentina de cobre de 5 mm de diâmetro interno encontra-se mergulhada na coluna líquida, acima do banco de transdutores. A alimentação do caldo é realizada com auxílio de uma bomba dosadora acionada eletricamente por um sensor de nível de caldo. Simultaneamente à entrada de caldo, ar comprimido é admitido na câmara de ultrassonicação, passando pelo interior de uma serpentina em forma de helicóide, mergulhada na coluna líquida de caldo. O trecho final da serpentina que fica acima da superfície livre da coluna d'água, levando o fluxo de ar quente para entrar em contato com a névoa fria de caldo atomizado. A coluna líquida remanescente da atomização do líquido pode chegar a cerca de 50°C no interior do protótipo. Dessa fora, a serpentina percorrida pela corrente de ar mantém a temperatura da coluna líquida abaixo de 40°C e aquece o ar de modo a aumentar a capacidade de saturação de vapor d'água nesse ar de arraste da névoa. A mistura constituída de névoa ultrassônica e ar quente passam por três espécies de compartimentos. Primeiro por uma pré-câmara, contendo uma espécie de rampa, a qual deve contribuir para retorno de caldo devido a um possível arraste por uma corrente de ar sob efeito da formação de vórtex. Tanto o compartimento de vaporização ultrassônica quanto essa pré-câmara são revestidas externamente por uma camada de isolante térmico, para manutenção de uma determinada temperatura

desejada (45°C) a partir da qual os transdutores são automaticamente desligados. Após passar pela pré-câmara a mistura ar quente mais névoa ultrassônica entra na primeira região de condensação (3), onde parte da água líquida, trazida por arraste, pode ficar retida. Na base dessa câmara uma válvula permite a retirada de amostras para análise de pureza e coleta da água condensada. Na segunda região de condensação da névoa ultrassônica (4) completa-se a quantidade de vapor saturado em condições de ser condensado na temperatura de operação (10°C). O líquido condensado desta câmara também é retirado por uma válvula de amostra instalada na base desse compartimento. Um conduto instalado no topo da última câmara de condensação auxilia na separação entre a água da névoa ultrassônica condensada e o ar de arraste, através de uma placa polimérica filtrante instalada no topo deste conduto.

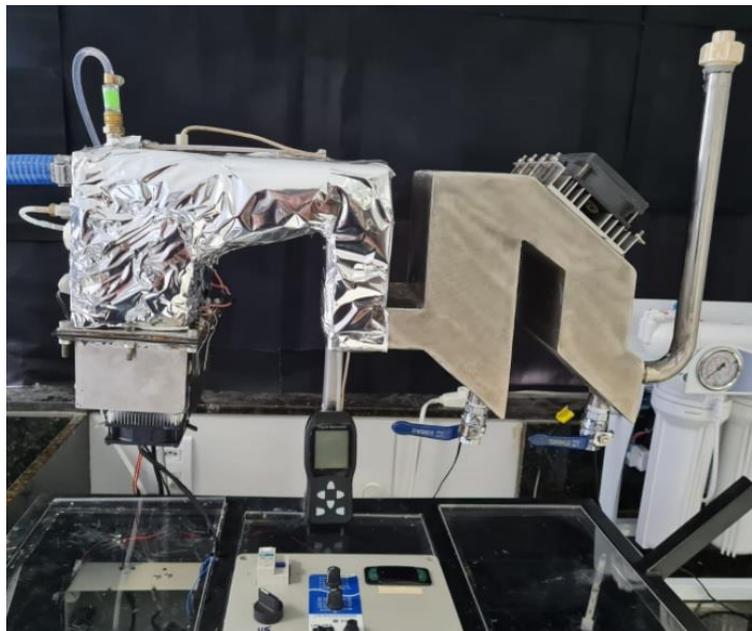
Figura 7 – Diagrama esquemático do protótipo de bancada utilizado para atomização do caldo de cana-de-açúcar com ondas ultrassônicas de alta frequência



Fonte: A autora (2022).

A Figura 8 mostra a fotografia do protótipo de bancada de atomização ultrassônica utilizado para experimentos com o caldo de cana.

Figura 8 – Protótipo de bancada utilizado para atomização do caldo da cana-de-açúcar

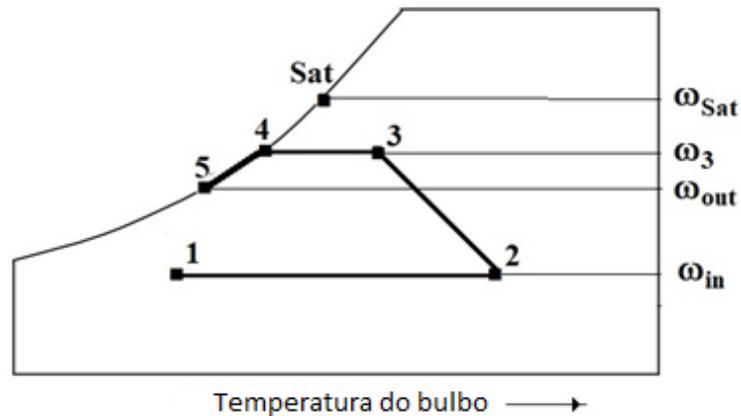


Fonte: a autora (2022).

A Figura 9 apresenta um esquema simplificado, em forma de carta psicrométrica (DEVRES, 1994), mostrando partes do protótipo de bancada usados nesta pesquisa. No ponto 1 o ar atmosférico encontra-se com temperatura e pressão ambientes (do laboratório). No ponto 2 o ar atmosférico aquecido é descarregado na parte superior do protótipo, a uma temperatura acima da temperatura de bulbo seco que possuía no ponto 1. Esta elevação de temperatura é devido ao contato desta corrente de ar atmosférico com a parte líquida da água na câmara de vaporização ultrassônica. Observa-se ainda na Figura 9 que do ponto 2 ao ponto 3 o ar entra em contato com a névoa ultrassônica passando por um processo de umidificação adiabática. No ponto 3 o ar encontra-se a uma temperatura menor que a do ponto 2. Esta redução de umidade gera condensação de parte da névoa ultrassônica e dá origem à água separada do caldo de cana, a qual pode ser coletada na câmara de condensação (ponto 1). No ponto 5 a mistura de ar e névoa ultrassônica residual é separada e o ar úmido residual é liberado para a atmosfera. Os pontos de 1 a 5 têm suas propriedades psicrométricas esboçadas na Figura 9. Uma análise das propriedades psicrométricas da mistura composta de ar e vapor d'água permite fazer

estimativas para a quantidade de ar necessária para diferentes temperaturas de alimentação de ar para o protótipo (BELTRÁN-PRIETO; BELTRÁN-PRIETO, 2016).

Figura 9 – Esboço das propriedades psicrométricas do ar em diferentes pontos do protótipo de bancada de atomização ultrassônica do caldo de cana



Fonte: a autora (2022).

3.2 CARACTERIZAÇÃO DO CALDO DE CANA-DE-AÇÚCAR

Como matéria-prima utilizou-se caldo de cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*) da variedade RB 86 7515 (Figura 10), comercializada para obtenção de caldo/garapa em regiões canavieiras do estado de Pernambuco. Essa variedade tem características de produtividade alta baixa exigência de solos, alto teor de sacarose e médio teor de fibras (BRAGA JÚNIOR *et al.*, 2022).

A extração foi feita em moenda elétrica (Modelo B120 Baixo Ferro Botini/270 rpm/220v). Antes da moagem e extração do caldo, os colmos tiveram sua casca removida manualmente com faca e depois foram sanitizados com solução contendo 100 mg/L de cloro Ativo; após 15 minutos de contato com a solução sanitizante, o material foi enxaguado em água corrente potável. Também foi necessária a sanitização da moenda empregada na operação de extração do caldo. Após a moenda o caldo de cana-de-açúcar utilizado nas análises foi armazenado à -18°C .

Figura 10 - Cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*) da variedade RB 86 7515



Fonte: Autora (2023)

As análises físico-químicas são ferramentas que fornecem informações valiosas sobre sua composição, qualidade e características de determinadas substâncias. No contexto da indústria alimentícia, da agricultura e de diversas outras áreas, essas análises assumem um papel crucial na avaliação da segurança, qualidade e autenticidade de produtos e materiais.

Assim, as determinações analíticas para o presente estudo foram realizadas, em sua maioria, obedecendo aos métodos recomendados pela Association of Official Analytical Chemicals (AOAC, 2016):

- A determinação da **umidade** é fundamental para diversos produtos, como alimentos, medicamentos, cosméticos e materiais têxteis (AZEVEDO; SILVA, 2021). Ela influencia diretamente a qualidade, textura, *shelf life* e estabilidade do produto. A umidade foi determinada usando 5 mL do caldo em estufa a vácuo a 105°C até massa constante;

- O **teor de proteína bruta** é um indicador fundamental do valor nutritivo de alimentos, especialmente para produtos de origem animal (SILVA, 2019). Ele fornece

informações sobre a quantidade de aminoácidos presentes, essenciais para o desenvolvimento e manutenção do organismo. O teor de proteína bruta foi calculado a partir do teor total de nitrogênio determinado pelo método de Kjeldahl;

- **Os teores de sacarose e glicose** são cruciais para avaliar a doçura e o sabor de diversos produtos, principalmente alimentos e bebidas (SANTOS, 2018). A sacarose, conhecida como açúcar comum, é um dissacarídeo composto por glicose e frutose, enquanto a glicose é um monossacarídeo, o tipo mais simples de açúcar. Esses parâmetros foram determinados pelo método Lane-Eynon, através da titulação de oxirredução utilizando as soluções de Fehling A e B (ZAMBIAZI, 2010);

- **O teor de fibra bruta** é um componente importante da dieta alimentar, proporcionando saciedade, auxiliando na digestão e regulando o intestino (SOBRINHO, 2018). Sua determinação é essencial para avaliar a qualidade de alimentos, especialmente grãos, cereais e vegetais. A medida foi determinada pelo método de digestão química com adaptações de Zambiasi (2010);

- **O pH e a acidez** são parâmetros essenciais para avaliar a qualidade, sabor e segurança de diversos produtos (OLIVEIRA, 2016). O pH indica a acidez ou alcalinidade de uma substância, enquanto a acidez mede a quantidade de ácidos presentes. A determinação do pH foi realizada em um medidor de pH previamente calibrado com soluções tampão 4,0 e 7,0; para o calcular a acidez realizou-se uma titulação com uso de solução de hidróxido de sódio 0,1 M (ZAMBIAZI, 2010);

- **O teor de sólidos solúveis totais (SST)** representa a quantidade total de material sólido solúvel em água presente em uma amostra, expressa em porcentagem (g/100 g). Essa fração sólida solúvel inclui açúcares, proteínas, sais e outros compostos que se dissolvem em água, enquanto a parte restante corresponde à água ou outro solvente (LOFFREDO, 2013). Os SST foram determinados por refratometria adaptada para 20°C com refratômetro digital (ZAMBIAZI, 2010).

Todos os ensaios foram realizados com média de 6 valores experimentais independentes e os resultados expressos como média e incerteza da medida. Os resultados foram avaliados por análise de variância (ANOVA) seguido de teste Tukey utilizando o programa *Statística* da StatSoft® versão 12.0.

3.3 ESTUDO PARAMÉTRICO DA RECUPERAÇÃO DE ÁGUA NO PROTÓTIPO

A metodologia de superfície de resposta (MSR) foi utilizada para analisar os efeitos e interações das variáveis independentes nas taxas de recuperação de água contida no caldo de cana-de-açúcar. O planejamento experimental do tipo fatorial fracionário 2^{4-1} e a análise foram realizados utilizando o software STATISTICA de StatSoft®, Versão 12. A Tabela 3 apresenta as variáveis independentes reais e codificadas. Como variáveis independentes foram testadas: Vazão do ar de arraste (VAA) - X_1 (NL/h); Temperatura do ar de arraste (TAA) – X_2 (°C); Sólidos Solúveis Totais do caldo de cana na alimentação (SSTA) – X_3 (SST); Pressão manométrica do vapor no interior do protótipo de bancada (PMIPB) – X_4 (cm H₂O). A variável resposta do planejamento foi o teor de sólidos solúveis totais do caldo residual – SSTCR (SST). Os níveis das variáveis independentes foram obtidos por meio de ensaios preliminares. A partir dos resultados obtidos foram definidas as variáveis necessárias à aplicação de um delineamento composto central rotacionais (DCCR) para definição de condições adequadas de recuperação da água do caldo de cana nas condições operacionais do protótipo.

Tabela 3 - Variáveis reais e codificadas para o planejamento fatorial fracionário 2^{4-1} aplicada ao protótipo de bancada utilizado nesta pesquisa

Fatores	Níveis	
	-	+
Vazão do ar de arraste, NL/h (X_1)	120	140
Temp. do ar de arraste, °C (X_2)	55	65
Conc. de alimente., SST (X_3)	14	16
Pressão de vap. cm H ₂ O (X_4)	16	20

Fonte: a autora (2023).

3.4 ANÁLISE DA ÁGUA OBTIDA APÓS ATOMIZAÇÃO PARA USO EM CALDEIRAS

Nas análises físico-químicas, avalia-se nos aspectos químicos da água, a presença de minerais e compostos orgânicos. O ferro total e o cobre total, por exemplo, foram determinados por espectrofotometria de absorção atômica (AAS)

(ABNT, 2012), revelando a concentração desses metais pesados que podem levar à corrosão das caldeiras e à contaminação do vapor (SILVA *et al.*, 2019).

A dureza total, analisada por titulação com EDTA (ABNT, 2012), nos indica a presença de sais de cálcio e magnésio, que podem formar incrustações e reduzir a eficiência da transferência de calor (SANTOS, 2018). Avalia-se também o pH, medido por potenciometria com eletrodo de vidro (ABNT, 2012), fornecendo informações sobre a acidez ou alcalinidade da água, influenciando a corrosão e a solubilidade dos sais minerais (OLIVEIRA *et al.*, 2016).

Para o COT (Carbono Orgânico Total) e o TOG (Gorduras e Óleos), analisados por espectrofotometria de infravermelho (ABNT, 2012), revelam a presença de matéria orgânica, que pode levar à formação de espuma e depósitos nas caldeiras (SOUZA, 2020). A sílica, por sua vez, foi quantificada por espectrofotometria com molibdato de amônio (ABNT, 2012), expondo a concentração desse composto que também contribui para a formação de incrustações e reduz a eficiência da transferência de calor (SILVA *et al.*, 2019).

A alcalinidade total, medida por titulação com ácido sulfúrico (ABNT, 2012), indica a capacidade da água de neutralizar ácidos, um fator importante para o controle do pH (SANTOS, 2018). A condutividade, por sua vez, foi determinada por condutivímetro (ABNT, 2012), revelando a capacidade da água de conduzir eletricidade, um indicador da presença de sais dissolvidos (OLIVEIRA *et al.*, 2016). Já os STD (Sólidos Dissolvidos Totais), analisados por evaporação e secagem em estufa (ABNT, 2012), nos revelam a quantidade total de sais dissolvidos na água, que podem levar à formação de incrustações e depósitos (SOUZA, 2020).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 REALIZAÇÃO DE EXPERIMENTOS NO PROTÓTIPO DE BANCADA

Definidos os níveis e as variáveis de estudo, elaborou-se a matriz de planejamento conforme a Tabela 4, com os resultados da concentração de sólidos solúveis no caldo (SST). Em seguida, constatou-se que todos os efeitos principais, das variáveis independentes testadas eram estatisticamente importantes, de acordo com a Tabela de Anova mostrada pela Tabela 5. Na referida tabela, observa-se que tanto os valores dos fatores de Fisher (F) encontram-se acima de 16 e os níveis de confiança (valor de p) encontram-se abaixo de 0,05. Estes dois critérios são normalmente utilizados para a definição das escolhas dos fatores recomendados pela aplicação de planejamentos fatoriais fracionários.

Tabela 4 – Matriz de planejamento do fatorial fracionário 2^{4-1} aplicado na seleção dos parâmetros estatisticamente importantes para a recuperação da água do caldo de cana no protótipo ultrassônico de bancada

Rum	VAA X ₁	TAA X ₂	SSTA X ₃	PMIPB X ₄	SSTCR (SST)
1	-1	-1	-1	-1	87,11
2	1	-1	-1	1	79,18
3	-1	1	-1	1	88,46
4	1	1	-1	-1	84,29
5	-1	-1	1	1	81,99
6	1	-1	1	-1	77,11
7	-1	1	1	-1	85,99
8	1	1	1	1	78,25

Fonte: A autora (2023)

Tabela 5 – Tabela de ANOVA correspondente ao planejamento fatorial fracionário aplicado ao protótipo ultrassônico de bancada utilizado nos experimentos de recuperação da água contida no caldo de cana

Fator	SS	df	MS	F	p
X ₁	76,4466	1	76,44661	649,4350	0,000133
X ₂	16,8490	1	16,84901	143,1370	0,001256
X ₃	30,8505	1	30,85051	262,0836	0,000513
X ₄	5,4615	1	5,46151	46,3970	0,006472
Erro	0,3531	3	0,11771		
Total SS	129,9608	7			

Fonte: A autora (2023).

Com base nos resultados do planejamento fatorial fracionário, elaborou-se a Tabela 6 com as condições estabelecidas para aplicação de um delineamento do tipo DCCR 2⁴ em que se faz necessário esse estudo mais aprofundado mantendo as variáveis.

Tabela 6 - Variáveis reais e codificadas do DCCR aplicado ao protótipo ultrassônico de bancada utilizado nos experimentos de recuperação da água contida no caldo de cana

Fatores	Níveis				
	-2	-1	0	1	2
Vazão do ar de arraste, NL/h (X ₁)	110	120	130	140	150
Temp. do ar de arraste, °C (X ₂)	50	55	60	65	70
Conc. De alimente., SST (X ₃)	13	14	15	16	17
Pressão de vap. cm H ₂ O (X ₄)	14	16	18	20	22

Fonte: A autora (2023).

Após a definição dos níveis para as variáveis do DCCR (Tabela 6), o *software Statistica* forneceu a matriz de planejamento conforme a Tabela 7, a qual recebeu os complementos de valores da variável resposta (SSTCR, SST) em laboratório. Na referida tabela os valores máximos de SST alcançado pelas corridas com o protótipo ultrassônico de bancada encontram-se no ponto central do DCCR, evidenciando uma excelente distribuição de faixas de valores para o estudo da recuperação de água. Também se observa que os valores do aumento da recuperação da água têm proporcionalidade com todas as variáveis independentes utilizadas.

A análise de superfícies de resposta foi aplicada à Tabela 7, tendo-se iniciado pelo estudo de correlações entre os dados teóricos e experimentais, com auxílio da Tabela de ANOVA (Tabela 8). Na avaliação da validade dos dados experimentais para validação das correlações teóricas e experimentais foram identificados os seguintes critérios:

- A variância explicada ou coeficiente de determinação explica 87,49% das variações das condições operacionais do protótipo de bancada;

- Todos os termos de efeitos principais, lineares e quadráticos, são importantes estatisticamente;
- A afirmativa anterior baseia-se nos respectivos valores do fator de Fisher (> 16) e nos níveis de confiança ($p < 0,05$) de um possível modelo de previsão do fenômeno;
- O erro experimental dos experimentos, avaliado pela relação entre os valores $MS/(SS_{Lack\ of\ Fit} + SS_{Pure\ error}) = 0,003$, ou 0,31%;
- O termo *Lack of Fit* ou falta de ajuste é estatisticamente significativo, sendo o único valor que não se deseja validar.

Tabela 7 - Matriz de planejamento do DCCR com valores da variável resposta obtidos após experimentos com o protótipo ultrassônico de recuperação de água de caldo de cana

Run	VAA (X ₁)	TAA (X ₂)	SSTA (X ₃)	PMIPB (X ₄)	SSTCR (SST)
1	-1	-1	-1	-1	80,51
2	-1	-1	-1	1	75,32
3	-1	-1	1	-1	81,23
4	-1	-1	1	1	75,28
5	-1	1	-1	-1	83,7
6	-1	1	-1	1	62,21
7	-1	1	1	-1	61,98
8	-1	1	1	1	58,45
9	1	-1	-1	-1	82,22
10	1	-1	-1	1	67,23
11	1	-1	1	-1	75,54
12	1	-1	1	1	68,21
13	1	1	-1	-1	82,22
14	1	1	-1	1	72,22
15	1	1	1	-1	71,16
16	1	1	1	1	70,00
17	-2	0	0	0	67,41
18	2	0	0	0	72,61
19	0	-2	0	0	73,93
20	0	2	0	0	75,57
21	0	0	-2	0	77,25
22	0	0	2	0	76,34
23	0	0	0	-2	80,81
24	0	0	0	2	77,33
25	0	0	0	0	93,15
26	0	0	0	0	91,32
27	0	0	0	0	92,11
28	0	0	0	0	93,05

Fonte: A autora, 2023.

Dessa forma, dos cinco critérios de validação do modelo apenas um deles não atinge as condições requeridas. Sendo assim, o modelo estatístico de previsão pode ser adotado com uma pequena restrição de se investigar futuramente formas de reduzir as causas da falta de ajuste. Além disso pode-se ainda identificar 3 interações entre as variáveis independentes não significativas: X_1 versus X_3 ; X_1 versus X_4 ; X_2 versus X_4 .

Tabela 8 – Tabela de ANOVA para os resultados do DCCR da separação ultrassônica da água do caldo de cana no protótipo de bancada utilizado nesta pesquisa

Fator	SS	df	MS	F	p
VAA (L), X1	17,545	1	17,5446	23,547	0,016705
VAA (Q)	853,711	1	853,7108	1145,780	0,000057
TAA (L), X2	67,738	1	67,7376	90,912	0,002447
TAA (Q)	548,170	1	548,1704	735,709	0,000110
SSTA(L), X3	86,640	1	86,6400	116,281	0,001706
SSTA (Q)	437,163	1	437,1627	586,723	0,000154
PMIPB (L), X4	244,482	1	244,4817	328,123	0,000367
PMIPB (Q)	328,412	1	328,4120	440,767	0,000236
X1 (L) by X2 (L)	146,410	1	146,4100	196,499	0,000786
X1 (L) by X3 (L)	2,117	1	2,1170	2,841	0,190457
X1 (L) by X4 (L)	0,449	1	0,4489	0,602	0,494211
X2 (L) by X3 (L)	71,149	1	71,1492	95,491	0,002277
X2 (L) by X4 (L)	0,462	1	0,4624	0,621	0,488334
X3 (L) by X4 (L)	70,981	1	70,9806	95,264	0,002285
Lack of fit	283,365	10	28,3365	38,031	0,006131
Pure Error	2,235	3	0,7451		
Total SS	2283,150	27			

Fonte: A autora (2023).

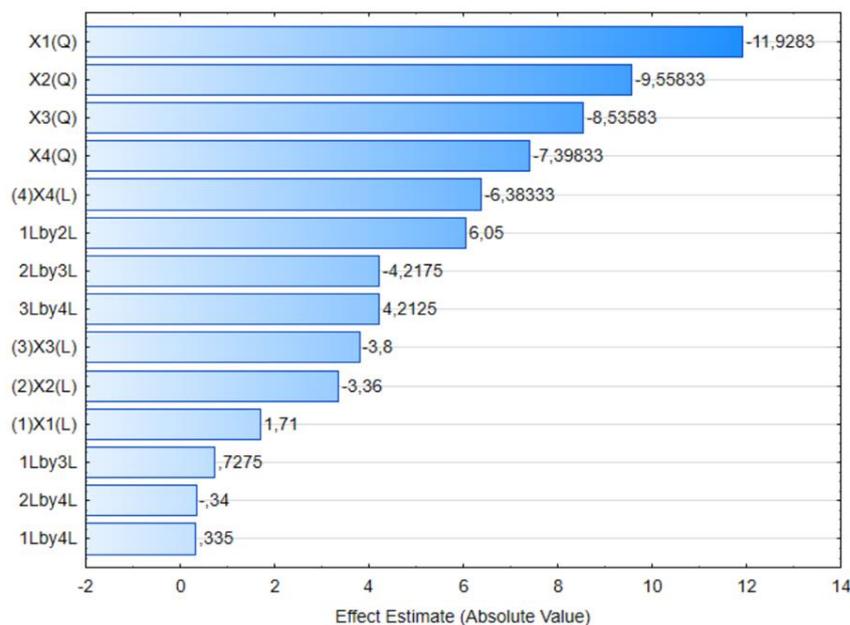
A partir da Tabela 8 foi gerado o gráfico de Pareto (Figura 11) que mostra os efeitos principais e interativos mais e menos significativos, em ordem decrescente dessas significâncias. Os sinais negativos associados aos efeitos indicam que a proporcionalidade existente é inversa. A partir da visualização do gráfico é possível analisar a contribuição dos efeitos das variáveis principais com aproximadamente 60% do impacto, de acordo com a inclinação do gráfico.

Para gerar as superfícies de resposta, responsáveis pelas ilustrações gráficas das correlações entre as variáveis independentes e a variável resposta foi proposto

pelo próprio software *Statistica*® o modelo estatístico de previsão (Equação 10). Estes modelos são usados para construir gráficos que ajudam a visualizar a relação entre as variáveis e a resposta. Esses gráficos de superfície de resposta (da Figura 12 a Figura 17) facilitam a identificação de condições ótimas para o processo em estudo, permitindo ajustes precisos para melhorar a eficiência e a qualidade do resultado final.

$$SSTS = 92,41 + 0,86X_1 - 5,95X_1^2 - 1,68X_2 - 4,78X_2^2 - 1,90X_3 - 4,27X_3^2 - 13,19X_4 - 3,70X_4^2 + 3,20X_1X_2 - 2,11X_2X_3 + 2,11X_3X_4 \quad (10)$$

Figura 11 - Diagrama de Pareto para ilustração da classificação dos efeitos mais significativos do DCCR do protótipo de bancada



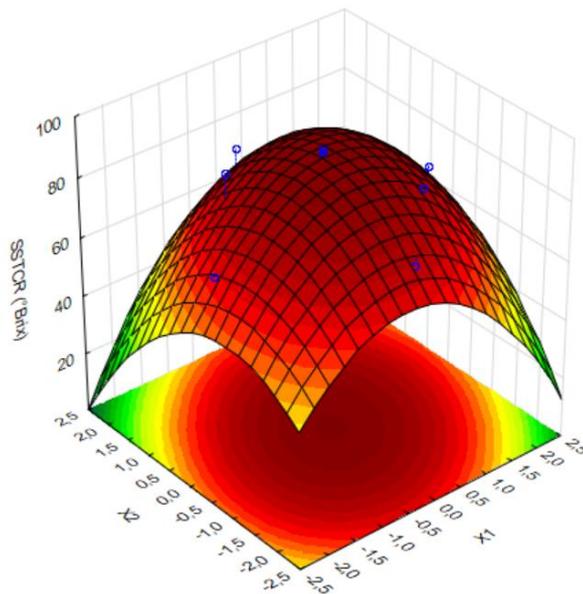
Fonte: A autora (2023).

Mesmo com a ausência de trabalhos científicos atuais, semelhantes na literatura, uma análise com bases científicas pode justificar as correlações entre a variável resposta e as variáveis independentes. Nas Figura de 12 a Figura 17 os perfis de aumento dos sólidos totais solúveis do caldo residual são plotados em função da vazão do ar de arraste e da temperatura do ar de arraste (Figura 12); da vazão do ar de arraste e do teor de sólidos totais solúveis do caldo de alimentação (Figura 13); da vazão do ar de arraste e da pressão manométrica interna do protótipo de bancada (Figura 14); da temperatura do ar de arraste e do teor de sólidos totais solúveis do caldo de alimentação (Figura 15); temperatura do ar de arraste e pressão manométrica interna do protótipo de bancada (Figura 16); do teor de sólidos totais

solúveis do caldo de alimentação pressão manométrica interna do protótipo de bancada (Figura 17). Os três perfis descritos nos referidos gráficos, com base na frequência fixa da radiação ultrassônica de 1,7 MHz e 4,54 W/transdutor de potência específica, pode-se justificar da seguinte forma:

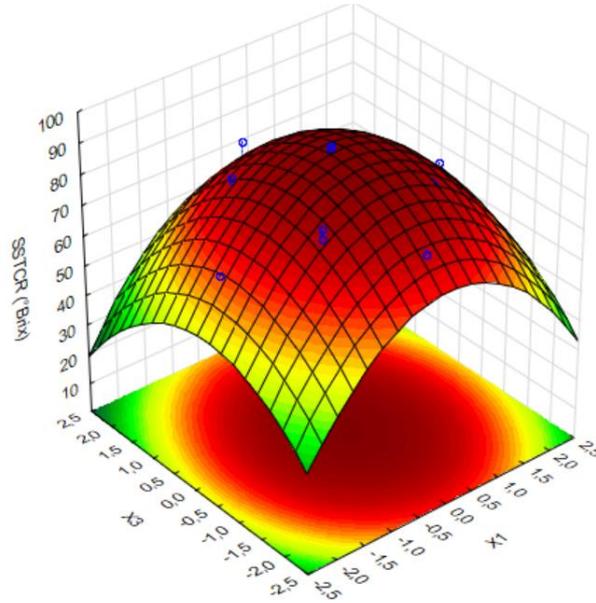
- Um aumento da vazão do ar de arraste corresponde (X_1) à um aumento da capacidade de umidificação (CHEN *et al.*, 2021), mas este efeito pode ser reduzido, uma vez que o tempo de contato pode também sofrer redução;
- Um aumento da temperatura do ar de arraste (X_2) eleva a capacidade de arraste do ar, mas eleva o volume de gases, com conseqüente aumento da vazão, reduzindo o tempo de contato;

Figura 12 - Superfície de resposta para o SST do caldo residual em função da vazão (X_1) e da temperatura do ar de arraste (X_2)



Fonte: A autora (2023).

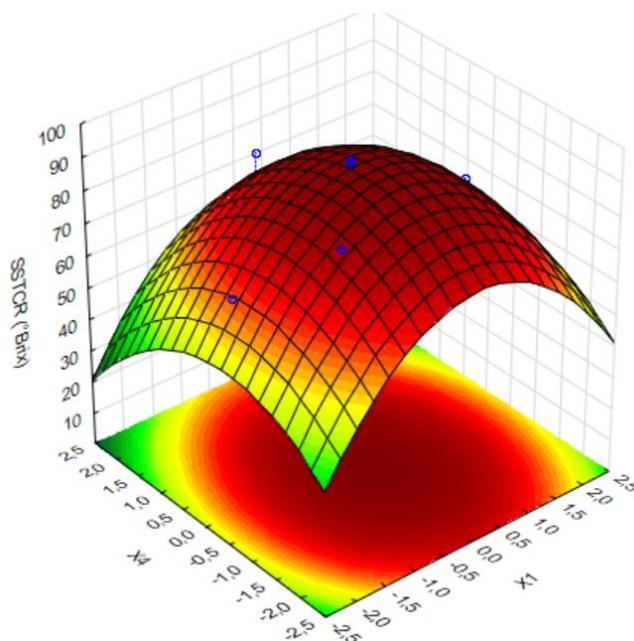
Figura 13 - Superfície de resposta para o SST do caldo residual em função da vazão (X_1) e do SST do caldo de alimentação (X_3)



Fonte: A autora (2023).

- Um aumento do teor de sólidos solúveis totais (X_3) aumenta a interação entre as ondas ultrassônicas e as partículas que ocupam as posições dos antinós, mas também podem ultrapassar o número de posições adequadas dessas partículas e reduzir o número de partículas interagindo com as ondas sonora (HOSSEINGHOLILOU; BANAKAR; MOSTAFAEI, 2019);

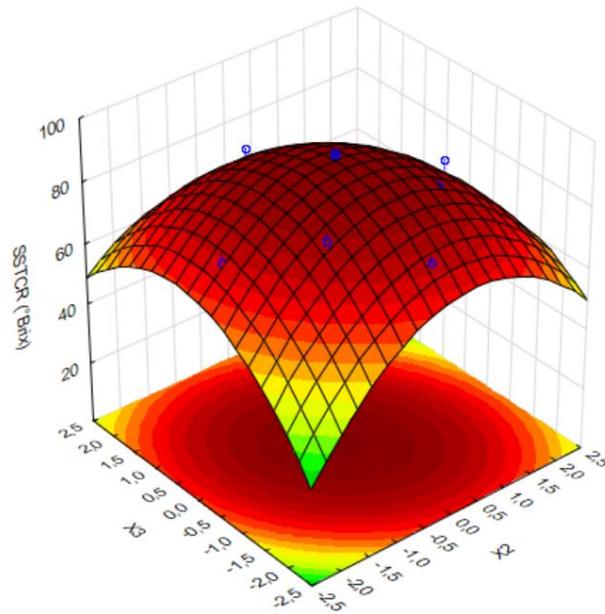
Figura 14 - Superfície de resposta para o SST do caldo residual em função da vazão (X_1) e da pressão manométrica interna do protótipo de bancada (X_4)



Fonte: A autora (2023).

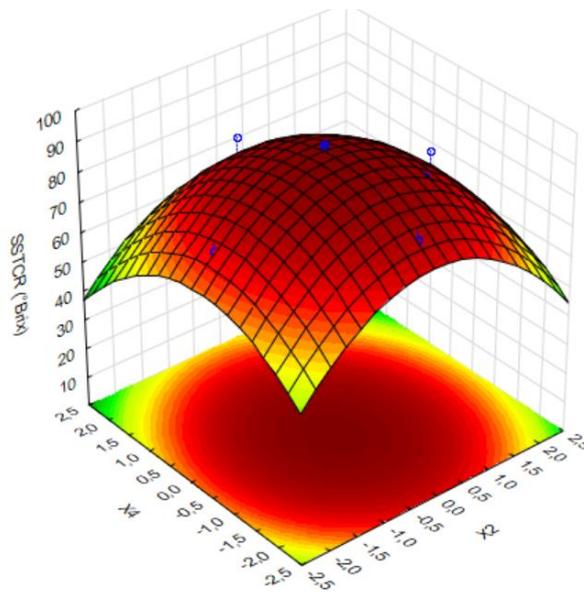
- Um aumento da pressão no interior do protótipo (X_4) contribui para um menor aumento de vazão e, conseqüentemente de recuperação de água conforme constatado pela análise de dados da Tabela 8;
- A análise ANOVA (Tabela 8) mostra que para a interação entre X_1 e X_2 o valor de p é $0,000786 < 0,05$, é estatisticamente significativa;
- Para a interação entre X_2 e X_3 , de acordo com a Tabela 8, tem-se o valor de p $0,002277 < 0,05$, sendo estatisticamente significativa;
- Na interação X_3 com X_4 o valor de p foi de $0,002285 < 0,05$ (Tabela 8), sendo estatisticamente significativo.

Figura 15 - Superfície de resposta para o SST do caldo residual em função da temperatura do ar de arraste (X_2) e da SST do caldo de alimentação (X_3)



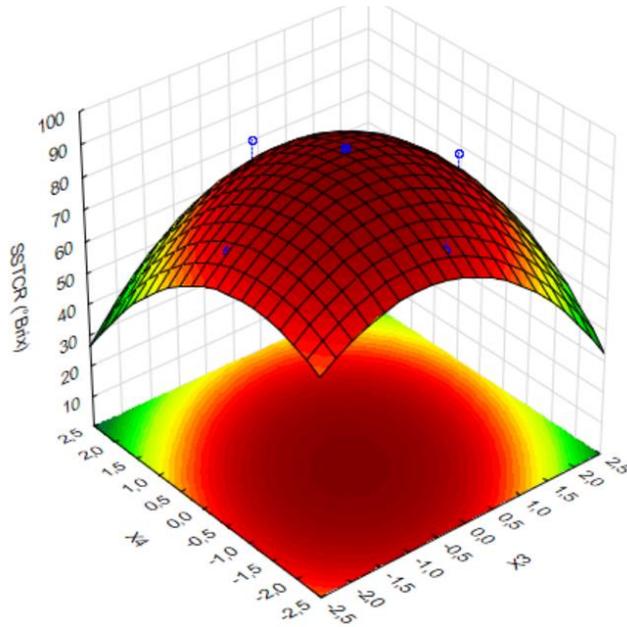
Fonte: A autora, 2023.

Figura 16 - Superfície de resposta para o SST do caldo residual em função da temperatura do ar de arraste (X_2) e da pressão manométrica interna do protótipo de bancada (X_4)



Fonte: A autora, 2023.

Figura 17 - Superfície de resposta para o SST do caldo residual em função SST do caldo de alimentação (X_3) e da pressão manométrica interna do protótipo de bancada (X_4)



Fonte: A autora, 2023.

4.2 EFEITO DO ULTRASSOM SOBRE O CALDO DE CANA

No presente estudo as mudanças de valores de importantes propriedades de composição e físico-químicas do caldo de cana-de-açúcar, antes e após a interação do caldo de cana com um campo ultrassônico de alta frequência (> 1 MHz). A literatura não forneceu trabalhos anteriores sobre o resultado desse tipo de interação especificamente, mas existem algumas investigações que podem ser comentadas em função da interação com campos ultrassônicos de baixa frequência.

O caldo de cana foi submetido a um campo ultrassônico frequência fixa de 1,7 MHz, durante sua atomização na câmara de sonicação do protótipo de bancada. A separação da água permitiu a obtenção da elevação dos SST do caldo residual, o qual teve algumas de suas propriedades comparadas com as do caldo de cana *in natura* para evidenciar os efeitos do campo ultrassônico sobre as propriedades características do caldo, necessárias na fabricação de açúcar e álcool. A Tabela 9 ilustra as variações ocorridas entre o caldo de cana com e sem a interação com o campo ultrassônico responsável pela atomização para vaporização a frio do caldo. Como era de se esperar os valores de umidade e sólidos solúveis totais (SST) tiveram o aumento e a redução correspondente à retirada da água pelos fenômenos integrados de vaporização a frio, umidificação e desumidificação. Conforma Bhapkar, Ghatule e Bhapkar (2018), o caldo de cana ao interagir com um campo ultrassônico de alta frequência tem seu valor reduzido de cerca de 1,3%. No caso da variedade de cana utilizada (RB 86 7515) o valor do pH do caldo *in natura* foi reduzido de 2,2%, mas mantido em valor absoluto acima dos valores do caldo *in natura* utilizado por Bhapkar, Ghatule e Bhapkar (2018). Testada por Zia e colaboradores (2019), a estocagem de caldo de cana, sob interação com um campo ultrassônico constante de 24 kHz, mostrou uma redução da acidez de 16,7% com consequente aumento do tempo de armazenamento do caldo. Contudo, de acordo com Brandão *et al.* (2022), a acidez da água de caldeira testada não sofreu variações quando submetida a um campo ultrassônico de frequência idêntica ao campo ultrassônico utilizado neste trabalho. A Tabela 9 deste estudo corrobora a observação de que a acidez do caldo atomizado sofreu uma pequena diminuição após o processo de condensação. O emprego de ultrassom de alta frequência, neste caso, encontra respaldo nos resultados de Brandão *et al.* (2022), que também apontaram para a ausência de alteração significativa na acidez da água atomizada. Os aumentos dos teores de proteína bruta, sacarose e glicose no caldo sonicado, quando comparado com o caldo

in natura também corrobora com o trabalho de Mukhtar *et al.* (2022). Na referida pesquisa houve um aumento nos sólidos solúveis totais (TSS), no conteúdo fenólico total (TPC), nos flavonoides totais (TFC), nos açúcares totais e nos açúcares redutores. Esses resultados foram atribuídos à maior capacidade de extração do US e ao aumento dos açúcares, principalmente pela conversão de dissacarídeos em monossacarídeos. Dessa forma, os efeitos das ondas ultrassônicas de alta frequência sobre o caldo de cana-de-açúcar mostrou ser uma técnica eficiente de preservação, em função da manutenção de suas características nutricionais.

Tabela 9 - Valores de parâmetros característicos do caldo de cana-de-açúcar sem e com a interação com campo ultrassônico para sua vaporização a frio

Propriedade	Caldo <i>in natura</i>	Caldo residual do protótipo de bancada
Umidade, %	79,85±0,08	12,01±0,06
Teor de proteína bruta, (g /100 mL)	0,17±0,01	0,31±0,02
Teor de sacarose, (g /100 mL)	20,23±0,09	22,51±0,06
Teor de glicose, (g /100 mL)	6,02±0,04	8,00±0,02
pH	5,92±0,05	5,79±0,06
Acidez Tituláveis Totais (ATT), (mg Ácido Cítrico/100 mL)	30,55±0,07	29,98±0,02
Sólidos solúveis totais (SST), %	19,25±0,09	88,50±0,07

Fonte: A autora, 2022.

4.3 O REUSO E O EFEITO DO ULTRASSOM NA ÁGUA RECUPERADA

Tendo-se as demandas de água em termos de vazão e qualidade dentro da usina, pode-se determinar empiricamente de que maneira as águas vão ser reutilizadas, ou seja, qual a corrente de água que poderia ser suprida e em que quantidade. Esta estratégia de reuso tem como princípio o suprimento das demandas mais exigentes em termos de qualidade, atendendo aos padrões mínimos requeridos pelo processo.

O resultado da análise de parâmetros físico-químicos da água recuperada do caldo de cana atomizado no protótipo de bancada deste trabalho encontra-se na Tabela 10. A referida tabela contém ainda a reprodução de valores do Tabela 2, referente à qualidade da água de resfriamento no intuito de mostrar o tipo de água cujas características físico-químicas que mais se aproximam da água recuperadas pelo protótipo de bancada utilizado neste trabalho. Ainda na Tabela 10, observa-se apenas a necessidade do uso de álcalis para o ajuste do pH.

Tabela 10 - Parâmetros físico-químicos mostrando as semelhanças entre a água recuperada e a água adequada para reuso para resfriamento

Parâmetro	Valor Máximo Permitido para caldeiras de até 21,1 kgf/cm ²	Água recuperada do protótipo de bancada do atomizador ultrassônico
OD (mg/L)	< 0,007	-
Ferro total (mg/L)	< 0,01	0,02
Cobre total (mg/L)	< 0,05	0,02
Dureza total (mg/L)	< 0,3	0,60
pH (a 25°C)	8,3 – 10	6,76
COT (mg/L)	< 1	0,88
TOG (mg/L)	< 1	0,55
Sílica (mg/L)	< 150	32,1
Alcalinidade total (mg/L)	≤ 350	15,06
Condutividade (μS)	5,4 – 1,1	4,55
STD (mg/L)	4,32 – 0,88	0,91

5 CONCLUSÃO CONSIDERAÇÕES FUTURAS

O método da evaporação a frio, utilizando atomização ultrassônica do caldo, além de se basear em uma técnica da engenharia verde é mais eficiente energeticamente do que a vaporização térmica. Utilizando um protótipo de bancada e a metodologia de superfície de resposta, o estudo explorou variáveis como vazão do ar de arraste, temperatura, os SST do caldo e pressão na câmara de atomização. Os resultados mostraram que o ultrassom não altera as propriedades do caldo de cana, além de garantir uma separação eficiente de água e contribuindo para processos mais sustentáveis. O estudo destaca a importância do planejamento experimental na otimização de processos industriais e demonstra que a combinação adequada de variáveis independentes pode maximizar a recuperação de água. O reuso da água recuperada foi recomendado para a maioria das aplicações internas de processos da indústria sucroalcooleira, após ajustes no pH, com exceção de reuso na alimentação de caldeiras.

Para futuros estudos, propõe-se melhorias como desenvolvimento de mecanismos para baratear as instalações de vaporização a frio do caldo, uma vez que em função das condições operacionais de atomização ultrassônica de temperatura e pressão próximas das condições ambientais. O protótipo de bancada também deve conter um número maior de estágios para verificação de atendimento da água recuperada na alimentação de caldeiras. Propõe-se também ainda o estudo da contribuição das ondas ultrassônicas e consequente inativação microbiana do caldo. Outro item a ser explorado pode ser a comparação de todas as propriedades do caldo sonificado residual com o caldo concentrado, produzido por processos de evaporação industrial convencional, praticada em usinas de açúcar de nosso Estado.

6 REFERÊNCIAS

ABDEL-ALEEM, W.M., Effect of Sugarcane Juice Pre-Treatment on the Quality and Crystallization of Sugarcane Syrup (Treacle), **Journal of Food Processing & Technology**, v. 11, n. 7, p. 1 – 12, 2020.

ABNT. NBR 9676:2012. Determinação do pH da água. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

ABNT. NBR 9677:2012. Determinação da dureza total da água - Método por titulação com ácido etilenodiaminotetraacético (EDTA). Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

ABNT. NBR 9679:2012. Determinação da alcalinidade total da água. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

ABNT. NBR 9680:2012. Determinação da condutividade elétrica da água. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

ABNT. NBR 10351:2012. Determinação do ferro total em águas - Método por espectrofotometria de absorção atômica. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

ABNT. NBR 10355:2012. Determinação do cobre total em águas - Método por espectrofotometria de absorção atômica. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

ABNT. NBR 10358:2012. Determinação do carbono orgânico total (COT) em águas - Método por espectrofotometria de infravermelho. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

ABNT. NBR 10359:2012. Determinação de gorduras e óleos em águas - Método por extração com solventes e gravimetria. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

ALFONSO-MUNIOZGUREN, P; SERNA-GALVIS, E. A.; BUSSEMAKER, M.; TORRES-PALMA, R. A.; LEE, J., **A review on pharmaceuticals removal from waters by single and combined biological, membrane filtration and ultrasound systems**, *Ultrasonics sonochemistry*, jul., v. 76, p. 1 – 23, 2021.

AL-JUBOORI, R. A. *et al*, Assessing the application and downstream effects of pulsed mode ultrasound as a pre-treatment for alum coagulation, **Ultrasonics Sonochemistry**, v. 31, p. 7–19, 1 jul. 2016.

ANA, Agência Nacional de Águas, **Manual de conservação e reuso de água na agroindústria e sucoenergética**, Brasília, 2009.

AMORIM, C. A.; VILLAS-BÔAS, L. A.; MORAIS, F. J.; MATULOVIC, M., Desenvolvimento de um sismógrafo empregando sensores piezoelétricos em plataforma Arduino, **Revista brasileira de ensino de física**, v.43, 2021.

ANUKAM, A.; MAMPHWELI, S.; REDDY, P.; MEYER, E.; OKOH, O., Pre-processing of sugarcane bagasse for gasification in a downdraft biomass gasifier system: A comprehensive review, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 66, p. 775 – 801, 2016.

AOAC. **Official methods of analysis of the association of official analytical chemists**. In G. W. Latimer Jr. (Ed.). 19 th ed. Gaithersburg, Maryland, 2016.

AVVARU, B.; MOHAN, N. PATIL, P.R.; GOGATE, A.B.P. Ultrasonic atomization: Effect of liquid phase properties. **Ultrasonics**, v. 44, n. 2, fev, p. 146-158, 2006,. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2005.09.003>.

AZEVEDO, L. C. G.; SILVA, R. F. Determinação da umidade em alimentos: métodos e aplicações. **Ciência Rural**, v. 51, n. 6, p. 1047-1060, 2021.

BELTRAN-PRIETO, J.C.; BELTRAN-PRIETO, L.A. Estimation of psychrometric parameters of vapor water mixtures in air, **Computer Application in Engineering Education** ,v. 24, 39–43, 2016,. <https://doi.org/10.1002/cae.21670>

BHAPKAR, A.H.; GHATULE, M.P. ; BHAPKAR, H.R. Study and Analysis of Effect of Ultrasonic Waves in Sugarcane Juice with Reference to the pH Value. **International Journal of Management, Technology And Engineering**, v.8, out, p. 588 – 592, 2018. ISSN NO: 2249-7455.

BHUKYA, J.; NAIK, R.; MOHAPATRA, D.; SINHA, L.K. ; RAO, K.V.R., Orifice based hydrodynamic cavitation of sugarcane juice: Changes in Physico-chemical parameters and Microbiological load, **LWT**, v. 150, p. 1 – 10, 2021.

BOX, G.E.P. ; WILSON, K.B. On the experimental attainment of optimum conditions. **Journal of the Royal Statistical Society: series B (methodological)**, v.13, p. 1 – 45, 1951.

BRAGA JUNIOR, R.L.C.; LANDELL, M.G.A.; XAVIER, M.A. et al., **CENSO VARIETAL IAC DE CANA-DE-AÇÚCAR NO BRASIL - SAFRA 2021/22**. Campinas: Instituto Agrônômico, 2023. 56p. Série Tecnologia APTA. Boletim Técnico IAC, 230, on-line; ISSN 1809-7936.

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>.

CARRER, M.J.; DE SOUZA FILHO, H.M.; VINHOLIS, M.M.B.; MOZAMBANI, C.I.; Precision agriculture adoption and technical efficiency: An analysis of sugarcane farms in Brazil, **Technological Forecasting and Social Change**, v. 177, p. 1 – 10, 2022.

CAVALCANTE, C.S.; ALBUQUERQUE, F.M., The sugar production process, **Sugarcane**, p. 285 – 310, 2015.

CHAVEZ-RODRIGUEZ, M.F.; MOSQUEIRA-SALAZAR, K.J.; ENSINAS, A.V.; NEBRA, S.A. Water reuse and recycling according to streamqualities in sugar–ethanol plants, **Energy for Sustainable Development**, v. 17, n. 5, p. 546 – 554, 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.esd.2013.08.003>.

CHEN, Q.; AKHTAR, F.H.; BURHAN, M.; KUMJA, M.; NG, K.C., A novel zero-liquid discharge desalination system based on the humidification-dehumidification process: A preliminary study. **Water Research**, v. 207, p. 1 – 12, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117794>.

CHEN, SL., Review laser-generated ultrasound transmitters and their application to all-optical ultrasound transducer and imaging, **Applied Sciences**, v.7, n. 1, p. 1 – 22, 2017. <https://doi.org/10.3390/app7010025>

CHOONG, W.H.; NASIP, M.N.B., Ultrasonic atomiser system performance characterisation study for water purification system development. **Transactions on Science and Technology**, v. 8, p. 239 – 244, 2021.

COSTA, G.H.G.; FREITA, C.M.D.; MENDES, F.Q.; ROVIERO, J.P.; MUTTON, M.J.R., Acrylamide replaced by moringa extract in sugar production, **Food Science and Technology**, v. 38, n. 4, p. 591 – 599, 2018.

CONTO LÓPEZ, R.A.; CORREA ESPINAL, A.A.; ÚSUGA MANCO, O.C., Run orders in factorial designs: A literature review, **Communications in Statistics - Theory and Methods**, p. 1 – 19, 2023. DOI: 10.1080/03610926.2023.2185472

CONTRERAS, A.M.; ROSA, E.; PÉREZ, M.; VAN LANGENHOVE, H.; DEWULF, J., Comparative Life Cycle Assessment of four alternatives for using by-products of cane sugar production, **Journal of Cleaner Production**, v. 17, p. 1 – 8, 2009.

DEVRES, Y.O. Psychrometric properties of humid air: Calculation procedures. **Applied Energy**, v. 48, p. 1 – 18, 1994. [https://doi.org/10.1016/0306-2619\(94\)90063-9](https://doi.org/10.1016/0306-2619(94)90063-9).

DI DONATO, G. F.; TARGA, M. S.; ALMEIDA, A. A. S., **Otimização do uso de recursos hídricos em uma usina de produção de etanol**, Revista em Agronegócio e Meio Ambiente, v. 14, n. 1, Maringá – PR, p. 1 – 13, jan-mar, 2021. Disponível em: <https://li01.tci-thaijo.org/index.php/fabjournal/article/view/243939>

EGHBALI-ARANI, M.; SOBHANI-NASAB, A; RAHIMI-NASRABADI, M.; AHMADI, F.; POURMASOUD, S., Ultrasound-assisted synthesis of YbVO₄ nanostructure and YbVO₄/CuWO₄ nanocomposites for enhanced photocatalytic degradation of organic dyes under visible light, **Ultrasonics sonochemistry** v. 43, p. 120 – 135, janeiro, 2018.

ELARBE, B.; ELGANIDI, I.; RIDZUAN, N.; YOUSOH, K.; ABDULLAH, N.; KUMAR, S.V. Application of full factorial design to screen the factors influencing the wax deposition of Malaysian crude oil. **Journal of Petroleum Exploration and Production Technology**, v. 12, p. 1829 – 1839, 2022. <https://doi.org/10.1007/s13202-021-01431-8>

EMBRAPA, **Dinâmica do cultivo de cana-de-açúcar no Brasil 1990 – 2018**, Jaguariúna-São Paulo, Set., 2020.

EMBRAPA, **Uso de gemas individualizadas de cana-de-açúcar para a produção de mudas**, Jaguariúna-São Paulo, Mai., 2019.

ENSINAS, A.V.; NEBRA, S.A.; LOZANO, M.A.; SERRA, L.M., Analysis of process steam demand reduction and electricity generation in sugar and ethanol production from sugarcane, **Energy Conversion and Management**, v. 48, p. 2978 – 2987, 2007.

GAL, P.Y.L.; MASSON, J.L.; BEZUIDENHOUT, C.N.; LAGRANGE, L.F., Coupled modelling of sugarcane supply planning and logistics as a management tool, **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 68, p. 168 – 177, 2009.

GARNIER, C. ; GUIGA, W. ; LAMELOISE, M. L ; FARGUES, C., Water reuses in the food processing industries : a review on pressure-driven membrane process as reconditioning treatments, **Journal of Food Engineering**, v. 344, p. 1 – 48, mai, 2023.

GEREMIAS-ANDRADE, I.M.; ROCHETO, A.C.; GALLO, F.A.; PETRUS, R.R., The shelf life of standardized sugarcane juice stored under refrigeration, **Food Science and Technology**, v. 40, n. 1, p. 95 – 101, 2020.

GRAMINHA, E.B.N.; GONÇALVES, A.Z.L.; PIROTA, R.D.P.B.; BALSALOBRE, M.A.A.; DA SILVA, R.; GOMES, E., Enzyme production by solid-state fermentation: Application to animal nutrition, **Animal Feed Science and Technology**, v. 144, n. 1-2, p. 1 – 22, 2008.

GERALDO, V. C. Et al, **Sugar extraction by moving-bed diffusers in ethanol production : development of a simulation tool**, Computer Aided Chemical Engineering, v. 38, p. 1425 – 1430, 2016.

GONÇALVES FILHO, M.; NUNHES, T.V.; BARBOSA, L.C.F.M.; CAMPOS, F.C.; OLIVEIRA, O.J., Opportunities and challenges for the use of cleaner production to reduce water consumption in Brazilian sugar-energy plants, **Journal of Cleaner Production**, v. 186, p. 353 – 363, 2018.

HAMED, M.H.; KABEEL, A.E.; OMARA, Z.M.; SHARSHIR, S.W., Mathematical and experimental investigation of a solar humidification-dehumidification desalination unit. **Desalination**, v. 358, p. 9-17, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2014.12.005>.

HARVEY, G. ; GACHAGAN, A. ; MUTASA, T., Review of High Power Ultrasound – Industrial Applications and Measurement Methods, **IEEE Transactions on Ultrasonic, Ferroelectrics, and Frequency Control**, v. 61, n. 3, p. 481 – 495, Março, 2014.

HASSANI, A.; MALHOTRA, M.; KARIM, A.V.; KRISHNAN, S.; NIDHEESH, P.V., Recent progress on ultrasound-assisted electrochemical processes: A review on mechanism, reactor strategies, and applications for wastewater treatment, **Environmental Research**, v. 205, p. 1 – 17, 2022.

HAWLADER, M.; DEY, P.K.; DIAB, S.; CHUNG, C.Y. Solar assisted heat pump desalination system. **Desalination**, v. 168, p. 49 – 54, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2004.06.168>.

HOSSEINGHOLILOU, B.; BANAKAR, A.; MOSTAFAEI, M. Design and evaluation of a novel ultrasonic desalination system by response surface methodology.

Desalination and Water Treatment, v. 164, p. 263–275, 2019. <https://doi.org/10.5004/dwt.2019.24458>.

HU, A.; ZHENG, J.; QIU, T., Industrial experiments for the application of ultrasound on scale control in the Chinese sugar industry, **Ultrasonics Sonochemistry**, v. 13, n. 4, p. 329 – 333, 2006.

ISSAOUI, M.; JELLALI, S.; ZORPAS, A. A.; DUTOURNIE, P., Membrane technology for sustainable water resources management: challenges and future projections, **Sustainable Chemistry and Pharmacy**, v. 25, p. 1 – 21, 2022.

JULIOUS, S.A. Sample size of 12 per group rule of thumb for a pilot study. **Pharmaceutical Statistics**, v. 4, n. 4, p. 287–291, 2005. DOI: 10.1002/pst.18

KABEEL, A.B.D.E. ; EL-SAID, E.D.M.S., Applicability of flashing desalination technique for small scale needs using a novel integrated system coupled with nanofluid-based solar collector, **Desalination**, v. 333, n. 1, p. 10 – 22, 2014.

KANG, H.; YANG, Y.; CHANG, Z.; ZHENG, H.; DUAN, Z., Performance of a two-stage multi-effect desalination system based on humidification–dehumidification process, **Desalination**, v. 344, p. 339 – 349, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2014.04.004>.

KOBARA, H.; TAMIYA, M.; WAKISAKA, A.; FUKAZU, T.; MATSUURA, K. Relationship between the size of mist droplets and ethanol condensation efficiency at ultrasonic atomization on ethanol-water mixtures, **AIChE Journal**, v. 56, n. 3, p. 810 – 814, 2009.

LOFFREDO, E.; et al. Determinação do teor de sólidos totais em sucos de frutas por métodos refratométricos e gravimétricos. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 33, n. 3, p. 263-269, 2013.

MAHVI, A. Application of ultrasonic technology for water and wastewater treatment, **Iranian Journal of Public Health**, v. 38, n. 2, p. 1 – 17, 2009.

MANICKAM, S.; BOFFITO, D. C.; FLORES, E. M. M.; LEVEQUE, J. M.; PFLIEGER, R.; POLLET, B. G.; ASHOKKUMAR, M., Ultrasonic and sonochemistry: Editors' perspective, **Ultrasonic Sonochemistry**, v. 99, p. 1 – 18, 2023.

MANZOOR, M.F.; AHMAD, N.; AHMED, Z. ; SIDDIQUE, R. Mehmood, M. Usman, X.A. Zeng, Effect of dielectric barrier discharge plasma, ultra-sonication, and thermal processing on the rheological and functional properties of sugarcane juice, **Journal of Food Science**, v. 85, p. 3823 – 3832, 2020. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.15498>.

MASON, T.J.; LORIMER, J.P. Applied sonochemistry: the uses of power ultrasound in chemistry and processing, **Applied Sonochemistry**, 2002.

MELO, F.A.D., Remuneration system of sugarcane, **Sugarcane**, p. 407 – 422, 2015.

MOREIRA, J.R.; GOLDEMBERG, J., The alcohol program, **Energy Policy**, v. 27, p. 229 – 245, 1999.

MUKHTAR, K.; NAB, B.G.; ARSHAD, R.N.; ROOBAB, U.; YASEEN, B.; RANJHA, M.M.A.N.; AADIL, R.M.; IBRAHIM, S.A., Potential impact of ultrasound, pulsed electric field, high-pressure processing and microfluidization against thermal treatments preservation regarding sugarcane juice (*Saccharum officinarum*). **Ultrasonics Sonochemistry**, v. 90, p. 1 – 14, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2022.106194>.

NAIDU, H. ; KAHRAMAN, O. ; FENG, H., Novel applications of ultrasonic atomization in the manufacturing of fine chemicals, pharmaceuticals, and medical devices, **Ultrasonic Sonochemistry**, v. 86, p. 1 – 16, 2022.

NII, S.; MATSUURA, K.; FUKAZU, T.; TOKI, M.; KAWAIZUMI, F., A novel method to separate organic compounds through ultrasonic atomization, **Chemical Engineering Research and Design**, v. 84, p.412 – 415, 2006. <https://doi.org/10.1205/cherd05016>.

NIKOLOV, A.; WASAN, D., Air bubble bursting phenomenon at the air-water interface monitored by the piezoelectric-acoustic method, **Advances in Colloid and Interface Science**, v. 272, p. 1 – 8, 2019.

OLIVEIRA, A. C. et al. Análise da qualidade da água em sistemas de caldeiras: Um estudo comparativo. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 20, n. 4, p. 801-812, 2016.

OLIVEIRA, A.C.G.; SPOTO, M.H.F.; CANNIATTI-BRAZACA, S.G.; SOUSA, C.P.; GALLO, C.R., Efeitos do processamento térmico e da radiação gama na conservação de caldo de cana puro e adicionado de suco de frutas, **Food Science and Technology**, v. 27, n. 4, p. 863 – 873, 2007.

OLIVEIRA, G. M.; et al. Determinação do pH e acidez em alimentos: métodos e aplicações. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 45, n. 5, p. 803-810, 2016.

OLIVEIRA, L. A. ; MIRANDA, J. H. ; COOKE, A. C., Water management for sugarcane and corn under future climate scenarios in Brazil, **Agricultural Water Management**, v. 201, p. 199 – 206, Marc. 2018.

PAIVA, R. P. O.; MORABITO, R., Um modelo de otimização para o planejamento agregado da produção em usinas de açúcar e álcool, **Gestão & Produção**, v. 14, n. 1, p. 25 – 41, Abri. 2007.

PALACIOS-BERECHE, M.C.; PALACIOS-BERECHE, R.; ENSINAS, A.V.; GALLEGO, A.G.; MODESTO, M.; NEBRA, S.A., Brazilian sugar cane industry – A survey on future improvements in the process energy management, **Energy**, v. 259, p. 1 – 19, 2022.

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, 2011.

PEITER, F. S.; HANKINS, N. P.; PIRES, E. C., Evaluation of concentration technologies in the design of biorefineries for the recovery of resources from vinasse, **Water Research**, v. 157, p. 483 – 497, 2019.

PILLI, S. *Et al.* **Ultrasonic pretreatment of sludge : a review**. *Ultrason Sonochemistry*, v. 18, p.1–18, 2011.

RACKEMANN, D. W. ; MARASINGHEGEA, C. ; BROADFOOTA, R. ; BOOTTLEB, S. ; BRATLEYB, J. ; DOHERTYA, W. O. S., Investigation on the effect of the heating surface temperature of 1st evaporator on sucrose loss and the degradation of sugarcane juice constituents, **Journal of food engineering**, v. 329, p. 1 – 39, 2022.

RAHIMI, M.; SAFARI, S.; FARYADI, M.; MORADI, N., Experimental investigation on proper use of dual high-low frequency ultrasound waves - Advantage and disadvantage, **Chemical Engineering and Processing: Process Intensification**, v.78, p. 17 – 26, Abr., 2014. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2014.02.003>.

RAJAN, R. ; PANDIT, A.B. Correlations to predict droplet size in ultrasonic atomisation. **Ultrasonics**, v. 39, n. 4, p. 235 – 255, Jun, 2001. [https://doi.org/10.1016/S0041-624X\(01\)00054-3](https://doi.org/10.1016/S0041-624X(01)00054-3).

REZZADORI, K.; SERPA, L.; PENHA, F.M.; PETRUS, R.R.; PETRUS, J.C.C., Crossflow microfiltration of sugarcane juice – effects of processing conditions and juice quality, **Food Science and Technology**, v. 34, n. 1, p. 210 – 217, 2014.

RULLI, M.M.; VILLEGAS, L.B.; COLIN, V.L., Treatment of sugarcane vinasse using an autochthonous fungus from the northwest of Argentina and its potential application in fertigation practices, **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 8, p. 1 – 9, 2020.

SANCHETI, S.V.; GOGATE, P.R. A review of engineering aspects of intensification of chemical synthesis using ultrasound, **Ultrasonic Sonochemistry**, v. 36, p. 527 – 543, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2016.08.009>.

SANIIE, J.; WANG, B.; HUANG, X., Information transmission through solids using ultrasound, **IEE International Ultrasound Symposium**, Japão, p. 1 – 10, out, 2018. DOI: 10.1109/ULTSYM.2018.8579702.

SANTOS, J. M. Controle da qualidade da água em caldeiras: Um guia prático. Rio de Janeiro: Editora Blucher, 2018.

SANTOS, L. M.; et al. Determinação do teor de sacarose e glicose em alimentos: métodos e aplicações. **Química Nova**, v. 41, n. 6, p. 823-830, 2018.

SANTOS, P. F. A.; SPOLADOR, H. F. S., Valoração econômica da água na suplementação hídrica da agricultura brasileira em um modelo multissetorial de crescimento. **Revista de economia e sociologia rural**, v. 60, n. 1, 2022.

SANTOS, A; VIEIRA, J., Avaliação qualitativa de risco microbiológico à saúde humana para reúso de água na agricultura, **Livro de Resumos do XX Simpósio LusoBrasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental**, Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos, p. 200 – 205, Jul, 2022. ISBN 978-989-8509-31-4

SCHIEPPATI, D; MOHAN, M.; BLAIS, B.; FATTAHI, K.; PATIENCE, G.S.; SIMMONS, B.A.; SINGH, S.; BOFFITO, D.C., Characterization of the acoustic cavitation in ionic

liquids in a horn-type ultrasound reactor, **Ultrasonic Sonochemistry**, v. 102, p. 1 – 14, 2024.

SILVA, A. C. et al. Avaliação da qualidade da água para caldeiras industriais: Um estudo de caso. **Revista Brasileira de Engenharia Ambiental**, v. 24, n. 1, p. 1-10, 2019.

SILVA, D. M. P.; et al. Teor de proteína bruta em alimentos: métodos de determinação e importância nutricional. **Revista Brasileira de Saúde Pública**, v. 43, n. 1, p. 123-130, 2019.

SMUCKER, B.J.; STEVENS, N.T.; ASSCHER, J.; GOOS, P., Profiles in the Teaching of Experimental Design and Analysis, **Journal of Statistics and Data Science Education**, v. 31, n. 3, p. 211 – 224, 2023. DOI: 10.1080/26939169.2023.2205907.

SOBRINHO, A. F.; et al. Determinação do teor de fibra bruta em alimentos: métodos e importância nutricional. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 38, n. 1, p. 107-113, 2018.

SOUZA, F. M. et al. A importância do tratamento da água para caldeiras: Uma revisão de literatura. **Revista Brasileira de Engenharia Térmica**, v. 12, n. 2, p. 235-242, 2020.

SOVANI, S.D.; SOJKA, P.E.; LEFEBVRE, A.H., Effervescent atomization, **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 27, p. 483 - 521, 2001.

SUZUKI, K.; KIRPALANI, D.M.; MCCRACKEN, T.W., Experimental investigation of ethanol enrich behaviour in batch and continuous feed ultrasonic atomization, **Chemical Engineering Technology**, v. 29, n. 1, p. 44 – 49, 2006. <https://doi.org/10.1002/ceat.200500237>.

TOPP, M.N.; EISENKLAM, P., Industrial and medical uses of ultrasonic atomizers. **Ultrasonics**, v. 10, n. 3, p. 127 – 133, mai, 1972. [https://doi.org/10.1016/0041-624X\(72\)90009-1](https://doi.org/10.1016/0041-624X(72)90009-1).

TOURAB, A.E.; BLANCO-MARIGORTA, A.M.; ELHARIDI, A.M.; SUÁREZ-LÓPEZ, M.J., A novel humidification technique used in water desalination systems based on the humidification–dehumidification process: Experimentally and theoretically. **Water**, v. 12, n. 8, p. 1 – 23, 2020. <https://doi.org/10.3390/w12082264>.

VAJNHANDL, S.; MARECHAL, A. M. L. Ultrasound in textile dyeing and the decolourization/mineralization of textile dyes. **Dyes Pigments**, v. 65, p. 89–101, 2005. XIAO, W. Study on the Ultrasound Assisted Solar Energy Seawater Desalination System, in: **Qingdao Technological Univ.**, China, 2010. <https://globethesis.com/?t=2210330341951168> Acesso em 05 de janeiro de 2024 às 19 :56.

XU, J.; WANG, Z.; CHANG, C.; FU, B.; TAO, P.; SONG, C.; SHANG, W.; DENG, T., Solar-driven interfacial desalination for simultaneous freshwater and salt generation, **Desalination**, v. 484, p. 1 – 9, Jun, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2020.114423>.

YANNIOTIS, S.; XERODEMAS, K. Air humidification for seawater desalination, **Desalination**, v. 158, p. 313–319, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(03\)00469-7](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(03)00469-7).

YAO, Y., PAN, Y., LIU, S., 2020. Power ultrasound and its applications: A state-of-the-art review. **Ultrasonic Sonochemistry**, v. 62, p. 1 – 20, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.104722>.

YUAN, G.; ZHANG, L.; ZHANG, H. Experimental research of an integrative unit for air-conditioning and desalination, **Desalination**, v. 182, n. 1–3, p. 511 – 516, Nov, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2005.02.040>.

ZAMBIAZI, R. C. **Análise físico-química de alimentos**, Pelotas: Editora Universitária/UFPel, p. 202, 2010.

ZAMEN, M.; SOUFARI, S.M.; VAHDAT, S.A.; AMIDPOUR, M.; ZEINALI, M.A.; IZANLOO, H.; AGHABABAIE, H., Experimental investigation of a two-stage solar humidification-dehumidification desalination process, **Desalination**, v. 332, n. 1, p. 1-6, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2013.10.018>.

ZHANG, L.; DONG, H.; WANG, X. Temperature response in the process of ultrasonic seawater desalination, **IEEE International Ultrasonics Symposium**, p. 1–4, 2011.

ZHANG, Y.; YUAN, S; WANG, L., Investigation of capillary wave, cavitation and droplet diameter distribution during ultrasonic atomization, **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 120, p. 1 – 12, 2021.

ZIA, S.; KHAN, M.R.; ZENG, X.; SEHRISH, M.A.S.; AADIL, R.M., Combined effect of microwave and ultrasonication treatments on the quality and stability of sugarcane juice during cold storage, **International Journal of Food Science and Technology**, v. 54, n. 8, p. 2563 – 2569, 2019. doi:10.1111/ijfs.14167.