

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS-UFAL
CAMPUS ARAPIRACA
FÍSICA - LICENCIATURA

JOSÉ VALTER SANTOS COSTA

**ESTUDO DOS EFEITOS FÍSICOS, QUÍMICOS E BIOLÓGICOS DA CAVITAÇÃO
ACÚSTICA**

ARAPIRACA
2023

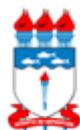
José Valter Santos Costa

Estudo dos Efeitos Físicos, Químicos e Biológicos da Cavitação Acústica

Monografia apresentada como requisito parcial para
obtenção do grau de Licenciado em Física em Física
- Licenciatura da Universidade Federal de Alagoas -
UFAL, *Campus* Arapiraca.

Orientador: Prof. Dr. José Pereira Leão Neto

Arapiraca
2023



Universidade Federal de Alagoas – UFAL
Campus Arapiraca
Biblioteca *Campus* Arapiraca - BCA

C837e Costa, José Valter Santos
Estudo dos efeitos físicos, químicos e biológicos da cavitação acústica / José Valter Santos Costa. – Arapiraca, 2023.

56 f.: il.

Orientador: Prof. Dr. José Pereira Leão Neto.
Trabalho de Conclusão de Curso (Licenciatura em Física.) -, Universidade Federal de Alagoas, Campus Arapiraca, Arapiraca, 2023.
Disponível em: Universidade Digital (UD) – UFAL (*Campus* Arapiraca).
Referências: f. 56-53

1. Cavitação acústica 2. Ondas sonoras 3. Ondas ultrassônicas I. Leão Neto, José Pereira. II. Título.

CDU 53

José Valter Santos Costa

Estudo dos Efeitos Físicos, Químicos e Biológicos da Cavitação Acústica

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC), apresentado como requisito parcial para obtenção do grau de Licenciatura em Física da Universidade Federal de Alagoas - UFAL, Física Licenciatura.

Data de Aprovação: 21/08/2023

Banca Examinadora

Documento assinado digitalmente
 JOSE PEREIRA LEAO NETO
Data: 23/08/2023 09:26:44-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. José Pereira Leão Neto
Universidade Federal de Alagoas - UFAL
Campus Arapiraca
(Orientador)

Documento assinado digitalmente
 JOSE HENRIQUE ARAUJO LOPES DE ANDRADE
Data: 23/08/2023 09:14:07-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Jose Henrique Araujo Lopes de Andrade
Universidade Federal de Alagoas - UFAL
Campus Arapiraca
(Examinador)

Documento assinado digitalmente
 LIDIANE MARIA OMENA DA SILVA LEAO
Data: 23/08/2023 09:23:38-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. Lidiane Maria Omena da Silva Leão
Universidade Federal de Alagoas - UFAL
Campus Arapiraca
(Examinador)

Estude muito o que mais lhe interessa da maneira mais indisciplinada, irreverente e original possível - Richard Feynman

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a minha família por esta conquista. Se não fosse pelo apoio deles, nada disso seria possível. Agradeço a minha mãe Valdenice, ao meu pai, José Caetano, a minha irmã Vagna Valéria e ao meu irmão, José Vagner. Gostaria de agradecer à minha noiva e amada Eshilli Shayane por todo o apoio e dedicação aos meus momentos de tensão, pois sei que sem o apoio dela, tudo seria diferente.

Tenho uma enorme gratidão aos meus amigos mais próximos da graduação, Ulisses Cleveesson, José Carlos, Silvio Henrique, Mateus Costa, Jadielson Florentino e a muitos outros colegas que foram importantes para o meu processo de aprendizagem e aos momentos de descontração.

Sou muito grato ao meu orientador Prof. Dr. José Pereira Leão Neto pelo anos de orientação e aprendizado. Além de todo o corpo docente do curso de Física Licenciatura da UFAL *Campus* Arapiraca, em especial para ao Prof. Dr. José Henrique Araújo Lopes de Andrade, Profa. Dra. Lidiane Maria da Silva Leão, Prof. Dr. Samuel Silva de Albuquerque, e aos diversos professores que tive nessa jornada. Para essas pessoas, agradeço por todos os ensinamentos e conhecimentos compartilhados durante os anos que vivenciei como aluno, que sem dúvidas me proporcionaram uma excelente formação acadêmica.

Por fim, agradeço à CNPQ por todo o apoio durante minha iniciação científica.

RESUMO

Ondas são perturbações que se propagam em um meio transportando energia, momento e informação. O som é um tipo de onda mecânica, esse tipo de onda precisa de um meio material para se propagar. O ultrassom é uma onda sonora na faixa acima dos 20 kHz. A cavitação acústica pode ser gerada quando o ultrassom é aplicado em um meio aquoso, por causa da diferença de pressão causada pelas ondas sonoras, bolhas de vapor são geradas e ficam oscilando nos ciclos de rarefação e compressão da onda até o momento de sua implosão. No instante do colapso violento das bolhas, altas temperaturas e altas pressões são obtidas, podendo gerar efeitos físicos, químicos e biológicos. O processo de geração de bolhas em um meio aquoso devido a aplicação de ultrassom é um fenômeno que vem sendo extremamente abordado nas ciências aplicadas, sobretudo nesta última década, muito por causa das inúmeras aplicabilidades e devido a sua abrangência em várias áreas como, por exemplo, nas áreas da sonoquímica, na indústria do petróleo, em áreas clínicas e na biomedicina. Desta maneira, o principal objetivo deste trabalho é formar uma análise qualitativa de como o estudo da cavitação acústica está sendo abordado em diversas aplicações dos efeitos físicos, químicos e biológicos nos últimos 4 anos. Para esta finalidade, fizemos pesquisas na literatura focando nos efeitos mais importantes da cavitação acústica, ou seja, os efeitos mais presentes na literatura. Utilizamos plataformas de pesquisa como *Google Scholar*, Periódico da CAPES, *Web of Science*, *Scopus* e *Scielo* para a realização deste trabalho.

Palavras-chave: cavitação acústica; ultrassom; aplicações.

ABSTRACT

Waves are disturbances that propagate in a medium carrying energy, momentum and information. Sound is a type of mechanical wave, this type of wave needs a material medium to propagate. Ultrasound is a sound wave in the range above 20 kHz. Acoustic cavitation can be generated when ultrasound is applied in an aqueous medium, because of the pressure difference caused by the sound waves, vapor bubbles are generated and oscillate in the cycles of rarefaction and suffering of the wave until the moment of its implosion. At the instant of violent collapse of the bubbles, high temperatures and high pressures are transient, and may generate physical, chemical and biological effects. The process of generating bubbles in an aqueous medium due to the application of ultrasound is a phenomenon that has been extremely accurate in applied sciences, especially in the last decade, largely because of the innumerable applicability and due to its scope in several areas, such as , in the areas of sonochemistry, in the oil industry, in clinical areas and in biomedicine. In this way, the main objective of this work is to form a qualitative analysis of how the study of acoustic cavitation is being controlled in several applications of physical, chemical and biological effects in the last 4 years. For this purpose, research done in the literature focusing on the most important effects of acoustic cavitation, that is, the effects most present in the literature. We used research platforms such as *Google Scholar*, *CAPES Journal*, *Web of Science*, *Scopus* and *Scielo* to carry out this work.

Keywords: acoustic cavitation; ultrasound; applications.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Onda longitudinal em um fluido	11
Figura 2 – Onda transversal em uma corda	12
Figura 3 – Espectro sonoro	15
Figura 4 – Gráfico da pressão acústica em relação a x	15
Figura 5 – (a) 1° padrão: $\lambda/2$ (b) 2° padrão: λ e (c) 3° padrão: $3\lambda/2$	17
Figura 6 – Nós (N) e antinós ou ventres (V)	18
Figura 7 – Ondas de choque em um avião	19
Figura 8 – (a) Transdutores para ultrassonografia e (b) Transdutor de <i>Langevin</i>	21
Figura 9 – Efeito piezoelétrico	22
Figura 10 – Elemento líquido	23
Figura 11 – Interação entre a onda e o meio aquoso	24
Figura 12 – (a) Cavitação acústica instável. (b) Cavitação acústica estável	25
Figura 13 – Pesquisa utilizando os filtros por anos	28
Figura 14 – Pesquisa utilizando os filtros por efeitos	28
Figura 15 – Cavitação acústica entre 2017 até 2022	29
Figura 16 – Cavitação acústica e seus efeitos físicos entre 2017 até 2022	30
Figura 17 – Cavitação acústica e seus efeitos químicos entre 2017 até 2022	30
Figura 18 – Cavitação acústica e seus efeitos biológicos entre 2017 até 2022	31
Figura 19 – Tendências de estudo sobre a cavitação acústica entre 2017 até 2022	31
Figura 20 – (a) <i>Streaming</i> acústico (b) <i>microstreamers</i> (c) micro-jatos e (d) ondas de choque	32
Figura 21 – Imagem real do <i>Microstreaming</i>	33
Figura 22 – Gráfico comparando as emulsões via ultrassom e via meios mecânicos	37
Figura 23 – Geração de oxidantes	39
Figura 24 – Esquema experimental	40
Figura 25 – Esquema experimental	41
Figura 26 – Procedimento experimental utilizando a cavitação acústica e hidrodinâmica	42
Figura 27 – Procedimento experimental	43
Figura 28 – Aparato experimental	44
Figura 29 – Aparato experimental	45
Figura 30 – Ilustração do fenômeno da sonoporação	47

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Nome	Unidade (S.I.)
Y_m	Amplitude	m
λ	Comprimento de onda	m
k	Número de onda	m^{-1}
T	Período	s
ω	Frequência angular	rad/s
f	Frequência	Hz
v	Módulo da velocidade do som	m/s
P	Pressão acústica	Pa
P_m	Amplitude da pressão acústica	Pa
\vec{E}	Campo elétrico	N/C
\vec{B}	Campo magnético	T
Y	Módulo de Young	Pa
τ	Temperatura absoluta	K
V	Potencial elétrico	V
p	Potência elétrica	W
I	Intensidade da onda	W/m^2
ρ	Densidade linear	kg/m^3
M	Número de <i>Mach</i>	
N_{uL}	Número de Nusselt	
$\vec{\psi}$	Velocidade do fluxo acústico	m/s
ξ	Pressão do fluido	Pa
η	Massa de cisalhamento	kg
μ	Viscosidade	$Pa \cdot s$
C_p	Capacidade calorífica a pressão constante	J/K
C_v	Capacidade calorífica a volume constante	J/K

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
2	ONDAS	11
2.1	ONDAS MECÂNICAS	11
2.2	DESCRIÇÃO MATEMÁTICA DAS ONDAS MECÂNICAS	12
2.3	VELOCIDADE DAS ONDAS MECÂNICAS	13
2.4	ONDAS SONORAS	14
2.5	VELOCIDADE DE ONDAS SONORAS EM DIFERENTES MEIOS	16
2.6	INTENSIDADE DE ONDAS SONORAS	16
2.7	ONDAS ESTACIONÁRIAS	17
2.8	RESSONÂNCIA	18
2.9	ONDAS DE CHOQUE	19
3	TRANSDUTORES DE <i>LANGEVIN</i> E CAVITAÇÃO ACÚSTICA	21
3.1	O EFEITO PIEZOELÉTRICO	21
3.2	CAVITAÇÃO ACÚSTICA	22
4	METODOLOGIA	27
5	RESULTADOS	29
5.1	EFEITOS FÍSICOS DA CAVITAÇÃO ACÚSTICA	31
5.1.1	<i>Streaming</i> acústico e <i>Microstreaming</i>	32
5.1.2	Ondas de choque e Micro-jatos da cavitação	34
5.2	EFEITOS QUÍMICOS DA CAVITAÇÃO ACÚSTICA	38
5.2.1	Geração de oxidantes e Aceleração de reação	38
5.2.2	Encapsulação	43
5.2.3	Transferência de massa	44
5.3	EFEITOS BIOLÓGICOS DA CAVITAÇÃO ACÚSTICA	46
5.3.1	Sonoporação	46
5.3.2	Eliminação de fungos e bactérias e a viabilidade celular	48
6	CONCLUSÃO	51
	REFERÊNCIAS	53

1 INTRODUÇÃO

Ondas são perturbações que se propagam em um meio transportando energia, momento e informação. O som é um tipo de onda mecânica, esse tipo de onda precisa de um meio material para se propagar, este meio pode ser um gás, um sólido ou um fluido. Geralmente, as ondas sonoras são longitudinais, ou seja, a direção de oscilação é a mesma direção de propagação. No entanto, em alguns casos podem se propagar na forma de cisalhamento, assumindo uma propagação transversal. As ondas sonoras que possuem frequência acima dos 20 kHz são chamadas de ultrassom. Essa propagação proporciona uma série de fenômenos bastante instigantes, um deles é a cavitação acústica que surge na interação entre ondas sonoras de alta frequência (ultrassom) com um meio aquoso. Podemos caracterizar uma onda através de uma série de características, como comprimento de onda (λ), velocidade da onda (v), frequência (f) e período (T). E podemos dividir o espectro sonoro em 3 subdivisões simples: Infrassom, Som audível e Ultrassom.

A descoberta do ultrassom ocorreu em 1880 por Curie estudando o efeito piezoeletrico. Thornycroft e Barnaby em 1894 observaram que na propulsão de mísseis lançados pelo destróier uma fonte de vibração era gerada causando implosão de bolhas e/ou cavidades na água. Essa vibração ficou conhecida como cavitação (MARTINES et al., 2000). Com a tragédia do Titanic, causado por um *Iceberg*, houve uma preocupação muito grande em se conhecer a topografia do fundo do mar. Langevin em 1912 desenvolveu um aparelho capaz de medir a profundidade do mar, atualmente conhecido como SONAR (*Sound Navigation And Ranging*). O SONAR envia um pulso de ultrassom da quilha de um barco para o fundo do mar e esta onda é refletida para um detector, o qual também está situado na quilha. O intervalo de tempo entre o envio e o recebimento do pulso permite a determinação da profundidade, já que a profundidade é igual ao produto da metade do intervalo de tempo pela velocidade do som na água (MARTINES et al., 2000). A geração de cavitação através de ondas acústicas começou a ser abordado depois dos anos de 1920, embora no início fosse uma análise muito mais quantitativa. Depois que a tecnologia ultrassônica foi evoluindo, logo foi percebido como a cavitação poderia ser útil e importante para diversas áreas. Como limpeza industrial, processos químicos e processos biológicos (NEPPIRAS, 1984).

O objetivo deste trabalho é usar plataformas de pesquisas para obter resultados qualitativos acerca da cavitação acústica e seus efeitos físicos, químicos e biológicos, e aplicações nos últimos 4 anos. Focando nas principais aplicações encontradas na literatura. Inicialmente falaremos sobre ondas acústicas e sua propagação, logo a seguir daremos um foco para os transdutores de *Langevin* e cavitação acústica, depois falaremos dos resultados obtidos, falando dos efeitos físicos, químicos e biológicos da cavitação acústica e suas aplicações. Este trabalho terá como foco as aplicações do ultrassom na geração da cavitação acústica em vários efeitos físicos, químicos e biológicos nos últimos 4 anos.

2 ONDAS

Ondulações em um lago, sons musicais, tremores sísmicos causados por um terremoto são exemplos de fenômenos ondulatórios. Uma onda surge quando um sistema é deslocado de sua posição de equilíbrio e a perturbação se desloca ou se propaga de uma região para outra do sistema (YOUNG, 2016). Em outras palavras, uma onda é qualquer efeito (perturbação) que se transmite de um ponto a outro de um meio (NUSSENVEIG, 2014).

2.1 ONDAS MECÂNICAS

Uma onda mecânica é uma perturbação que se desloca através de um meio, no qual a onda se propaga. À medida que a onda se propaga através do meio, as partículas que o constituem sofrem deslocamento de diversas espécies dependendo da natureza da onda (YOUNG, 2016). Na figura 1, o meio é um líquido ou gás no interior de um tubo com uma parede rígida na extremidade direita do tubo e um pistão móvel na extremidade esquerda. Se fizermos o pistão oscilar para frente e para trás, uma perturbação de deslocamento uma flutuação de pressão se propagam ao longo do meio. Nesse caso, as partículas do meio oscilam para a frente e para trás ao longo da mesma direção de propagação da onda; esse movimento denomina-se onda longitudinal (YOUNG, 2016).

Figura 1 – Onda longitudinal em um fluido

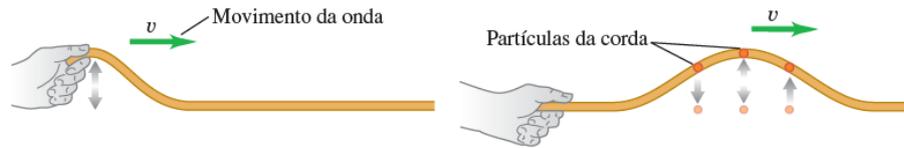


Fonte: Young *et al* (2016)

À medida que a onda passa, cada partícula da corda se move para a frente e para trás, paralelamente ao movimento da onda em si (YOUNG, 2016). As ondas sonoras na atmosfera são ondas longitudinais desse tipo, em que a perturbação consiste em compressões e rarefações da densidade da atmosfera (NUSSENVEIG, 2014).

Na figura 2, o meio é um fio ou uma corda esticada sob tensão. Quando agitamos ou balançamos a extremidade esquerda da corda, a agitação se propaga através de seu comprimento. As seções sucessivas da corda sofrem o mesmo tipo de movimento que aplicamos em sua extremidade, mas em tempos sucessivamente posteriores. Como os deslocamentos do meio são perpendiculares à direção de propagação da onda ao longo do meio, este movimento é chamado de onda transversal (YOUNG, 2016).

Figura 2 – Onda transversal em uma corda



Fonte: Young *et al* (2016)

À medida que a onda passa, cada partícula da corda se move para cima e para baixo, transversalmente ao movimento da onda em si (YOUNG, 2016). Um exemplo extremamente importante de ondas transversais são as ondas eletromagnéticas, em que os campos elétrico \vec{E} e magnético \vec{B} em cada ponto oscilam mantendo-se sempre perpendiculares à direção de propagação. As ondas de luz são, assim como as ondas de rádio, são ondas eletromagnéticas. O meio em que as ondas se propagam, neste caso, não precisa ser um meio material: pode ser o vácuo (NUSENVEIG, 2014).

Existem vários tipos de ondas: Ondas sonoras, ondas de luz, ondas de rádio e outros. Todos os tipos de ondas têm as mesmas propriedades fundamentais de reflexão, refração, difração e interferência, e todas as ondas têm um comprimento de onda, frequência, velocidade e amplitude. Portanto, podemos definir ondas como oscilações que transmitem energia e momento, podendo, também, transmitir informação.

2.2 DESCRIÇÃO MATEMÁTICA DAS ONDAS MECÂNICAS

As oscilações que estamos estudando são fenômenos físicos, logo, deve haver uma descrição matemática para tais efeitos. A equação que será mostrada abaixo é a chamada equação da onda em uma dimensão, uma das equações mais importantes da física, pois ela descreve qualquer tipo de onda.

$$\frac{\partial^2 y(x, t)}{\partial t^2} = v^2 \frac{\partial^2 y(x, t)}{\partial x^2}. \quad (1)$$

O primeiro termo é a segunda derivada parcial da posição em relação ao tempo; o segundo termo é a segunda derivada parcial da posição em relação a coordenada x e v é a velocidade da onda. A solução geral da equação da onda é

$$y(x, t) = Ae^{i(kx - \omega t)}. \quad (2)$$

O termo A é uma constante. Utilizando as fórmulas de Euler, podemos chegar a seguinte função senoidal

$$y(x, t) = Y_m \text{sen}(kx - \omega t). \quad (3)$$

O termo k é o número de onda, x é a posição em x , ω é a frequência angular, t é o tempo e Y_m é a amplitude da onda.

A equação 3 nos mostra o padrão oscilatório da onda, pois essa função trigonométrica é uma função periódica, logo temos uma função senoidal. Portanto, designamos essa onda como onda senoidal. Diante desses conceitos, podemos descrever qualquer onda em termos dos seguintes parâmetros:

- Comprimento de onda (λ): Podemos definir como a distância entre duas cristas sucessivas ou entre dois vales consecutivos. Sua unidade no sistema de unidades é o metro (m);
- Amplitude (Y_m): É definido como o módulo máximo do vetor deslocamento do corpo a partir da posição de equilíbrio. Sua unidade no sistema de unidades é o metro (m);
- Fase: É o termo $kx - \omega t$ da função seno. Como há um deslocamento temporal e espacial da onda, o termo $kx - \omega t$ muda, variando o sinal entre 1 e -1;

- Número de onda (k):

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}. \quad (4)$$

Pela equação, observamos que o número de onda tem unidade de m^{-1}

- Período (T): É o tempo correspondente a um ciclo. Ele sempre é positivo. Sua unidade no sistema de unidades é o segundo (s);
- Frequência (f): É o número de ciclos em uma unidade de tempo. Ela é sempre positiva. A unidade no sistema de unidades é o *hertz* (Hz);

$$1 \text{ hertz} = 1 \text{ Hz} = 1 \text{ ciclo/s} = 1 \text{ s}^{-1}.$$

Existe uma relação entre frequência e período descrita pela equação a 5. Desta maneira, podemos descrever a velocidade da onda pela a equação 6

$$f = \frac{1}{T}, \quad (5)$$

$$v = \lambda f. \quad (6)$$

2.3 VELOCIDADE DAS ONDAS MECÂNICAS

A velocidade da onda é uma das propriedades mais importantes para a descrição matemática de uma onda mecânica. Observamos que a velocidade em qualquer onda mecânica segue um certo padrão; uma relação entre uma força restauradora que devolve o sistema ao equilíbrio e a inércia que resiste à volta ao equilíbrio. A forma geral da velocidade de uma onda mecânica é

$$v = \sqrt{\frac{F_r}{\kappa}}. \quad (7)$$

O termo F_r representa uma força restauradora que devolve o sistema ao equilíbrio e κ representa a inércia que resiste à volta ao equilíbrio. Podemos citar como exemplo, uma corda, pois a velocidade da onda é descrita como

$$v_c = \sqrt{\frac{F}{\mu}}. \quad (8)$$

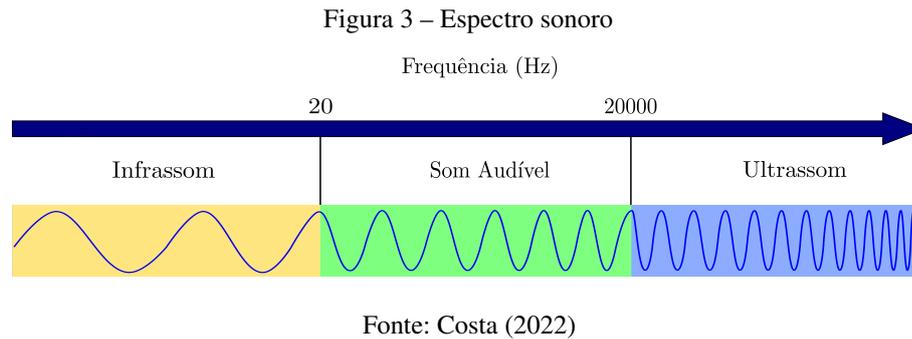
F é a tensão na corda e μ é a densidade linear da corda. Uma relação entre uma força restauradora que devolve o sistema ao equilíbrio e a inércia que resiste à volta ao equilíbrio.

2.4 ONDAS SONORAS

Ondas sonoras são ondas que se propagam em um meio material que possui propriedades elásticas. Exemplo: Água, ar ou um sólido. Quando os meios elásticos são submetidos a forças externas o meio tem uma tendência a preservar sua forma, comprimento o volume através de forças restauradoras que agem para que o meio material retorne à sua condição inicial, antes da aplicação da força externa (BORGES, 2017). As ondas sonoras surgem devido a diferenças de pressões do meio e, geralmente são ondas longitudinais, porém, em alguns casos, podem se comportar como ondas transversais.

A natureza do som está relacionada pelas vibrações de corpos materiais. Sempre que escutamos um som, uma vibração que gera ondas sonoras está sendo produzida. Um ótimo exemplo desse fenômeno é o sino de uma igreja, as vibrações causadas pelo sino de uma igreja faz todo o meio (ar) a sua volta vibrar. Esta vibração é transmitida através das moléculas de ar e finalmente até nossos ouvidos. Porém, se esse sino estivesse em uma região de ausência de matéria, o vácuo não teria essas vibrações, logo não haveria as ondas sonoras. Isso nos mostra que sempre haverá a necessidade de um meio material para a onda sonora se propagar. Diferentemente de outros tipos de ondas como a luz já que a luz é uma onda eletromagnética e não precisa de um meio material para a sua propagação.

Definimos algumas características de ondas mecânicas como frequência e velocidade da onda. Nosso ouvido é sensível aos sons em frequências na faixa de 20 Hz e 20 kHz, que é chamado de intervalo audível, em frequências menores, temos o infrassom e em frequências maiores, a partir dos 20 kHz, temos o ultrassom. O ultrassom tem diversas aplicações seja na medicina, indústria e inclusive na cavitação acústica, que será abordado em discussões posteriores deste trabalho. Na figura 3, temos o espectro sonoro que sintetiza o que foi falado acima. O ultrassom pode ser definido como ondas sonoras acima do limiar do alcance humano de ondas sonoras, geralmente acima dos 20 kHz.

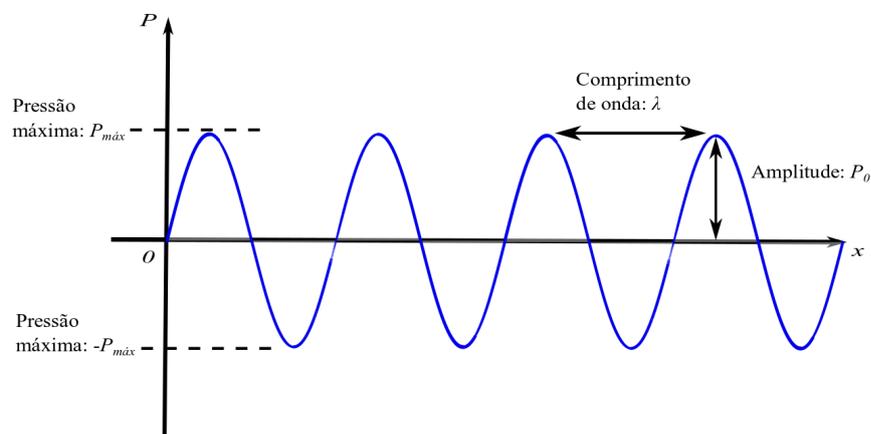


Como vimos, ondas mecânicas podem ser descritas em termos de deslocamento como previsto na equação 3, porém, quando estamos trabalhando com ondas sonoras, é muito mais conveniente utilizar flutuações de pressão ao invés de deslocamentos. O melhor exemplo dessa conveniência é o ouvido humano que funciona captando certas variações de pressão. Uma onda sonora entrando no canal auditivo exerce uma pressão flutuante sobre um lado do tímpano; o ar do outro lado, expelido pela tuba auditiva, está na pressão atmosférica. A diferença de pressão dos dois lados do tímpano põe o ar em movimento. Microfones e outros aparelhos, também captam diferenças de pressão ao invés de deslocamentos (YOUNG, 2016). Inclusive em nossos estudos aqui neste trabalho utilizaremos essa conveniência. A função que designa as flutuações de pressão é

$$P(x, t) = P_m \text{sen}(kx - \omega t). \quad (9)$$

Conhecida como função da pressão acústica. O termo P_m é a amplitude da pressão acústica. $P(x, t) = P_m$ é quando $\text{sen}(kx - \omega t)$ é igual a 1. Nesta situação, $P(x, t)$ é máxima. Essa situação é descrita na figura 4. Vemos que a pressão acústica é mínima quando $\text{sen}(kx - \omega t)$ é igual a -1. A figura 4 também mostra o comprimento de onda λ e a amplitude P_m .

Figura 4 – Gráfico da pressão acústica em relação a x



Fonte: O autor (2023)

2.5 VELOCIDADE DE ONDAS SONORAS EM DIFERENTES MEIOS

Como vimos, a forma geral da velocidade de uma onda mecânica é descrita na equação 7. Sendo assim, podemos nos questionar como é a expressão correspondente para a velocidade das ondas sonoras em um gás ou em um líquido. Nesse sentido, precisamos saber quais propriedades do meio a velocidade depende. Em um fluido, a velocidade do som é

$$v_f = \sqrt{\frac{B}{\rho}}. \quad (10)$$

O termo B é o módulo de compressão do fluido e ρ é a densidade do fluido. Já em um sólido, a equação da velocidade da onda se transforma em

$$v_s = \sqrt{\frac{Y}{\rho}}. \quad (11)$$

O termo Y é o módulo de Young e ρ é a densidade do material da barra. Agora em um gás ideal, a velocidade do som é

$$v_g = \sqrt{\frac{\gamma R \tau}{M}}. \quad (12)$$

O termo γ é a razão entre a capacidade calorífica à pressão constante C_p e capacidade calorífica à volume constante C_v . R é a constante universal dos gases, τ é a temperatura absoluta do gás e M é a massa molar do gás. No ar, na temperatura de $\tau=239$ K a velocidade do som é aproximadamente 344 m/s.

2.6 INTENSIDADE DE ONDAS SONORAS

Ainda podemos definir outra grandeza importante para o estudo das ondas acústicas que é a intensidade da onda. As ondas sonoras, assim como todo tipo de onda transfere energia de uma região do espaço para outra. Para ondas desse tipo, definimos a intensidade (simbolizada pela letra I) como a taxa média de tempo em que a energia é transportada pela onda, por unidade de área, sobre uma superfície perpendicular à direção de propagação. Ou seja, a intensidade I é a potência média por unidade de área, geralmente medida em *watts* por metro quadrado (W/m^2). Podemos definir a intensidade de uma onda sonora em um fluido ideal conforme a seguinte equação:

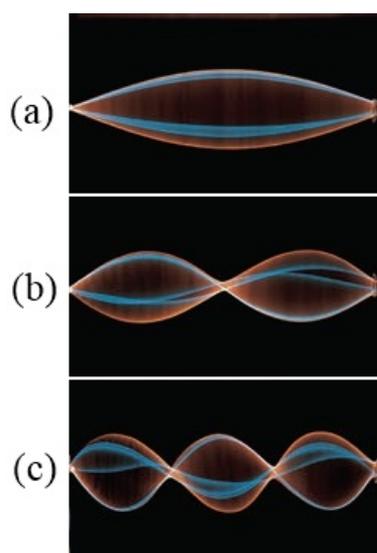
$$I = \frac{p_{max}^2}{2\rho v_f}. \quad (13)$$

O termo p_{max} é a potência máxima da onda sonora, ρ é a densidade do fluido e v_f é a velocidade do som no fluido descrito na equação 10.

2.7 ONDAS ESTACIONÁRIAS

Quando existem ondas num espaço confinado, como por exemplo, numa corda de comprimento L , esticada e presa em suas extremidades (ver a figura 2), as ondas que se propagam na corda sofrem reflexões em suas extremidades. As ondas refletidas se somam às ondas incidentes de acordo com o princípio de superposição. Um exemplo do princípio da superposição é a combinação de dois pulsos separados em um mesmo ponto para obter um deslocamento resultante. Na figura 5 mostramos um exemplo em que duas ondas senoidais se propagam em sentidos opostos com o mesmo comprimento de onda e amplitude. A onda é refletida em cada extremidade da corda. Esta onda é chamada de onda estacionária porque, apesar da forma da onda mudar com o tempo, ela não se propaga pela corda. Os pontos da corda que apresentam deslocamento transversal nulo são chamados de nós. Os pontos que apresentam deslocamento transversal máximo são chamados de ventre ou antinós como é visto na figura 6. Note, pela figura 5, que os antinós estão separados por meio comprimento de onda. Pode-se perceber que os nós também estão separados por meio comprimento de onda (BORGES, 2017).

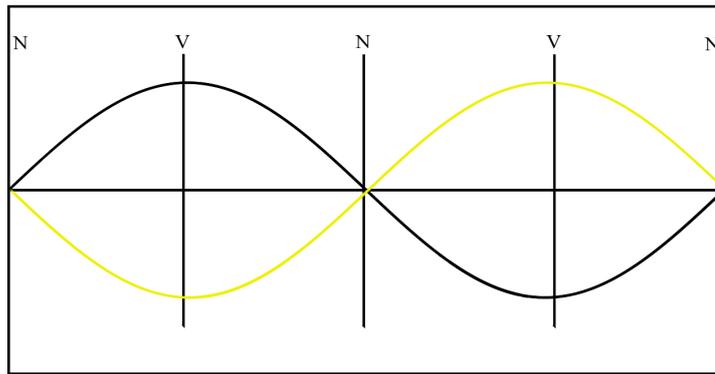
Figura 5 – (a) 1º padrão: $\lambda/2$ (b) 2º padrão: λ e (c) 3º padrão: $3\lambda/2$



Fonte: Young *et al* (2016)

Para exemplificar a abordagem das ondas estacionárias em ondas sonoras, vamos considerar a seguinte situação: Quando sonoras ondas longitudinais se propagam em um fluido no interior de um tubo, elas são refletidas nas extremidades do mesmo modo que as ondas transversais em uma corda. A superposição das ondas que se propagam em sentidos contrários também forma uma onda estacionária. Tal como no exemplo anterior de uma onda em uma corda, ondas sonoras em um tubo podem ser usadas para criar ondas (YOUNG, 2016).

Figura 6 – Nós (N) e antinós ou ventres (V)



Fonte: O autor (2023)

2.8 RESSONÂNCIA

Na figura 5 mostramos três modos de oscilações de uma onda estacionária gerada em uma corda de comprimento L . Para que as oscilações na corda tenham uma máxima amplitude devemos fornecer frequências bem definidas. Dizemos que o sistema entra em ressonância nestas frequências. Se colocarmos a corda vibrando em uma outra frequência diferente das frequências de ressonância, não será gerada uma onda estacionária na corda com amplitude máxima. Note na figura os nós e antinós, os quais só ocorrem em frequências bem definidas. Como as extremidades da corda não podem se mover, deve existir um nó em cada extremidade da corda (BORGES, 2017). Para certas frequências, a fonte da onda produz uma onda estacionária com nós e antinós como os da figura 5. Dizemos que uma onda estacionária desse tipo é gerada quando existe ressonância e que a corda ressoa nessas frequências, conhecidas como frequências de ressonância.

Na 5a existe apenas um antinó no centro da corda e dois nós (um em cada extremidade da corda). Este é o padrão mais simples em que há o fenômeno de ressonância. Neste caso, para que haja a ressonância devemos ter a seguinte relação entre o comprimento L da corda e o comprimento de onda da onda: $L=\lambda/2$. Notamos pela figura 5b que existem agora dois antinós separados por meio comprimento de onda e três nós (um em cada extremidade da corda e outro no centro). Este é o segundo padrão em que há o fenômeno de ressonância. Neste caso, para que haja a ressonância devemos ter a seguinte relação entre o comprimento L da corda e o comprimento de onda da onda: $L=\lambda$. Um terceiro padrão de ressonância é mostrado na figura 5c. Observamos que existem três antinós e quatro nós. Neste caso a ressonância ocorre para $L=3\lambda/2$ (BORGES, 2017). Sendo assim, podemos fazer a seguinte generalização

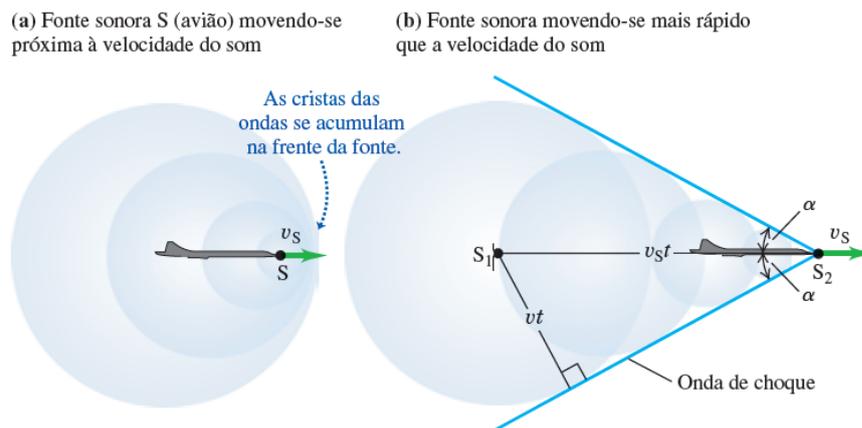
$$L = n \frac{\lambda}{2}, n = 1, 2, 3, \dots \quad (14)$$

O termo n é chamado de modos normais de vibração.

2.9 ONDAS DE CHOQUE

Um dos fenômenos acústicos mais conhecidos são as ondas de choque. Vamos imaginar um avião voando com uma velocidade maior que a velocidade do som no ar (figura 7a). Seja v_s o módulo da velocidade do avião em relação ao ar, de modo que ele sempre é positivo. O movimento do avião produz um som; quando v_s é menor que a velocidade do som v , as ondas na parte frontal do avião são comprimidas. À medida que a velocidade do avião v_s se aproxima da velocidade do som v , o comprimento de onda diminui e se aproxima de um valor muito pequeno, assim, as cristas das ondas se agrupam (figura 7b). O avião precisa exercer uma grande força para comprimir o ar que encontra pela frente; de acordo com a terceira lei de Newton, o ar exerce uma força igual em módulo e contrária em sentido igualmente grande sobre o avião. Deste modo, ocorre um grande aumento da resistência do ar à medida que a velocidade do avião se aproxima da velocidade do som, um fenômeno bastante conhecido como “barreira do som”. A figura 7b mostra o que ocorre em uma seção de reta. À medida que o avião se move, ele desloca o ar das regiões próximas e produz o som. Diversas cristas de onda são emitidas a partir da região frontal do avião; cada crista emitida no ponto S_1 se espalhou circularmente até um raio vt , e o avião se deslocou uma distância maior $v_s t$, atingindo o ponto S_2 . Podemos notar que existe interferência construtiva das ondas ao longo da reta mostrada na figura 7 que faz um ângulo α com a direção da velocidade do avião, produzindo uma crista de onda de amplitude muito grande ao longo desta crista. Essa crista de onda é chamada de onda de choque (YOUNG, 2016).

Figura 7 – Ondas de choque em um avião



Fonte: Young *et al* (2016)

Observe que na figura 7b, temos um triângulo retângulo, deste modo, temos a seguinte equação.

$$\text{sen}(\alpha) = \frac{v}{v_s}. \quad (15)$$

O termo α é o ângulo da onda de choque. O termo v_s é a velocidade da frente sonora e o termo v é a velocidade do som. A razão entre v_s e v é chamada de número de *Mach* (M). Descrita pela seguinte equação

$$M = \frac{v_s}{v}. \quad (16)$$

Retornaremos a falar sobre as ondas de choque nos próximos capítulos.

3 TRANSDUTORES DE *LANGEVIN* E CAVITAÇÃO ACÚSTICA

Um transdutor é um dispositivo que tem a capacidade de converter energia elétrica em vibrações mecânicas, isto é, pulsos elétricos em ondas sonoras, assim, transmitindo ultrassom de alta intensidade para o meio. Em resumo, há dois tipos de transdutores: Aqueles que funcionam em alta frequência, na ordem dos MHz, e os que operam em baixas frequências, na ordem dos kHz. Os de alta frequência como vemos na figura 8a são utilizados na área da ultrassonografia com foco em exames abdominais, na área obstétrica, veterinária e ginecológica, já os de baixa frequência, que observamos na figura 8b temos os transdutores de *Langevin*, que são os dispositivos que abordaremos aqui neste trabalho, pois este dispositivo será o aparato que vai emitir a onda ultrassônica a fim de gerar a cavitação acústica.

Figura 8 – (a) Transdutores para ultrassonografia e (b) Transdutor de *Langevin*



Fonte: (a) GE Healthcare (2022) e (b) Costa (2022)

Os transdutores de *Langevin* ou transdutores de potência são dispositivos formados por cerâmicas denominadas cerâmicas piezoelétricas empilhadas por duas massas metálicas, no qual são pré-tensionadas por um parafuso de alta resistência mecânica garantindo maior eficiência no desempenho do transdutor. Vemos um tipo de transdutor de *Langevin* na figura 8b. O comprimento total de um transdutor de Langevin deve ser $\lambda/2$ para que ele opere em ressonância, isto é, para que todos os componentes do transdutor estejam vibrando na mesma frequência, como vimos no capítulo anterior. Além disso, o comprimento do transdutor é quem determina a sua frequência de trabalho. Quanto mais massa o transdutor possuir, menor será a sua frequência (COSTA, 2022).

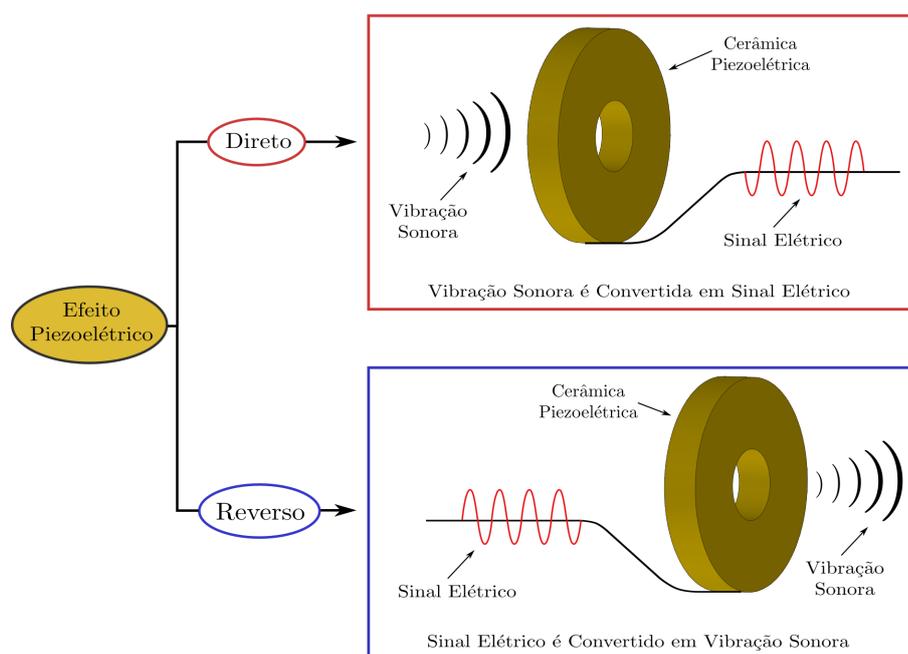
3.1 O EFEITO PIEZOELÉTRICO

O efeito piezoelétrico foi descrito pelos físicos Jacques e Pierre Curie, em 1880, na França, no qual afirmaram que certos materiais, como cerâmicas e cristais, sofrem deformações quando uma corrente elétrica passa através deles. Tal fato resulta em movimentos de contração e extensão alternadamente, que podem ser transformados em energia vibratória de alta frequência, causando oscilações (ROBIONY et al., 2004). O efeito piezoelétrico é um processo que os materiais piezoelétricos conseguem realizar, ocorrendo de forma direta e reversa (ver figura 9) a partir de uma perturbação que é aplicada no material em questão. Quando aplicamos uma

pressão mecânica em um material piezoelétrico, ele nos responde com um sinal elétrico. Os estudos de Lipmann confirmaram que o reverso também é válido, ou seja, se aplicarmos um sinal elétrico em um material piezoelétrico, ele irá responder com uma vibração mecânica, mais especificamente, com ondas sonoras. Desse modo, quando falamos de materiais piezoelétricos ambos os efeitos funcionam: uma tensão mecânica aplicada gera um sinal elétrico, e um sinal elétrico aplicado gera uma vibração mecânica. Nos transdutores de *Langevin* é utilizado o efeito piezoelétrico reverso, no qual, um sinal elétrico é aplicado nas cerâmicas piezoelétricas fazendo elas vibrarem de forma longitudinal, o que coloca o transdutor em funcionamento oscilando também de maneira longitudinal. Assim, suas vibrações geram ondas sonoras, que são irradiadas no meio material em que o dispositivo estiver operando (COSTA, 2022).

A cavitação acústica pode ser gerada a partir da faixa de frequência dos 20 kHz, no qual é utilizado os transdutores de *Langevin*. Para frequências ultrassônicas baixas (20–200 kHz), transdutores do tipo *Langevin* são usados para as finalidades (YASUI, 2018). Por isso é utilizado o fenômeno do efeito piezoelétrico para a geração de ondas sonoras para gerar cavitação acústica.

Figura 9 – Efeito piezoelétrico



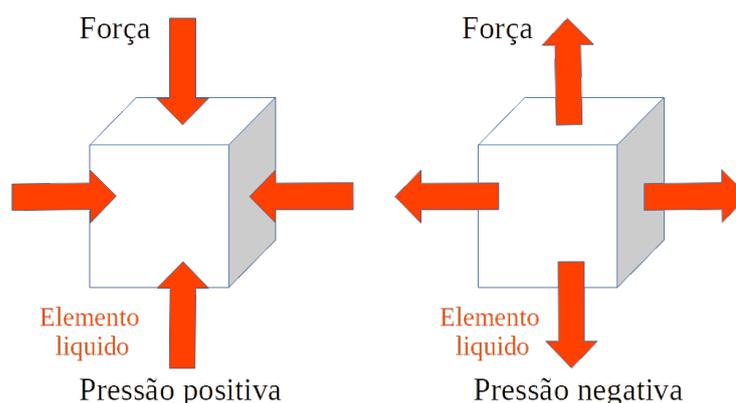
Fonte: Costa (2022)

3.2 CAVITAÇÃO ACÚSTICA

Quando uma onda sonora acima de 20 kHz é emitida em um meio aquoso, a interação entre essas ondas e o meio causará uma diferença de pressão no sistema, podendo gerar pequenas cavidades formadas por vapor, essas micro cavidades são chamadas de 'bolhas de cavitação'. No instante em que um líquido é irradiado por ultrassom, o fenômeno da cavitação acústica começa a ocorrer a partir do momento em que a amplitude da pressão do ultrassom atinge um

valor mínimo, isto é, a partir do momento em que o sistema atinge um determinado nível de energia. Este é conhecido como o limiar de cavitação. Vários critérios são utilizados para definir o início da cavitação, como a observação visual das bolhas, o início de ruídos da cavitação, e uma abrupta mudança nas propriedades de transmissão das ondas ultrassônicas no líquido ou no volume do mesmo. No entanto, isto não é sempre aparente. O limiar da cavitação é 100 kPa, essa é a mínima pressão acústica necessária para gerar a cavitação acústica. Em outras palavras, essas micro cavidades começam a se expandir e se contrair de forma alternada nos ciclos de rarefação (região de pressão negativa) e compressão (região de pressão positiva) da onda. Na fase de rarefação da onda ultrassônica, as pressões locais instantâneas no líquido se tornam negativas quando a amplitude da pressão acústica é maior que a pressão ambiente. Essa é a força que expande o elemento líquido. Já na fase de compressão, a onda exerce uma pressão acústica positiva no fluido, comprimindo o elemento líquido, e no final há o colapso violento da bolha. As oscilações sucessivas das bolhas no meio líquido caracterizam a cavitação acústica, como é observado na figura 10.

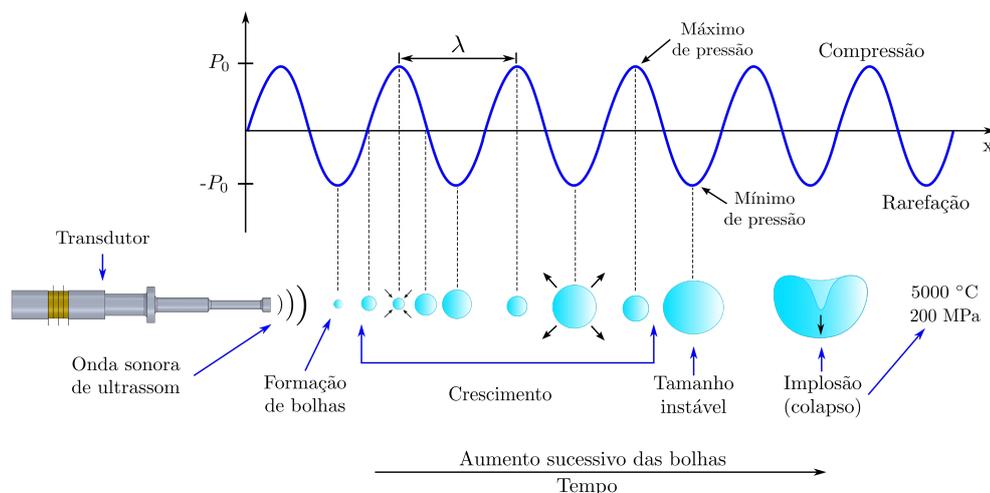
Figura 10 – Elemento líquido



Fonte: O autor (2023)

Durante o subsequente colapso destas bolhas, na etapa de compressão do ciclo, altas energias são geradas no interior das bolhas (RONCHI, 2014). No final da cavitação acústica, há um colapso violento da bolha, a temperatura e a pressão dentro de uma bolha aumenta para 5000 °C e 200 MPa, respectivamente, devido a uma compressão quase adiabática da bolha, devido a rapidez da implosão da bolha (YASUI, 2018) como é visto na figura 11. Porém, como o tamanho das bolhas é muito menor que o volume total de líquido, o aquecimento produzido é rapidamente dissipado, de forma que não há nenhuma mudança apreciável nas condições do meio (RONCHI, 2014). Esse aumento de temperatura e pressão podem gerar uma série de efeitos físicos, químicos e biológicos da cavitação acústica.

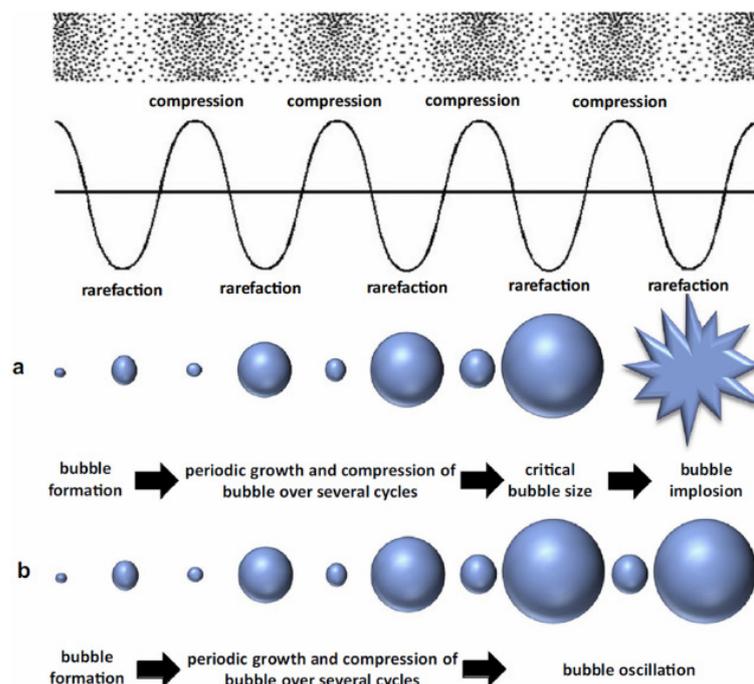
Figura 11 – Interação entre a onda e o meio aquoso



Fonte: Costa (2022)

É possível ter cavitação acústica em duas maneiras, a cavitação instável e a cavitação estável. A cavitação instável, cavitação inercial ou transiente é caracterizada pela expansão instável e o colapso rápido das bolhas. Nesta situação, a bolha se expande de forma instável e colapsa de maneira rápida e violenta. Ou seja, a bolha possui um curto tempo de vida, oscilando por apenas alguns ciclos acústicos nos quais a bolha cresce até atingir um tamanho crítico, no qual a bolha não é mais capaz de absorver energia. Quando isso acontece, a bolha já não é mais capaz de manter sua estrutura gerando a implosão da cavidade (ANTUNES, 2022). Na cavitação instável, é possível ter efeitos físicos, pode-se citar os micro-jatos e as ondas de choque. E temos a cavitação estável ou cavitação não inercial, em que, ondas sonoras de ultrassom de baixa intensidade proporcionam as bolhas permanecerem em mais de um ciclo de compressão e expansão antes de implodir, fazendo com que o tamanho das bolhas oscilem e cresçam com o passar do tempo, até o momento de implosão. A bolha oscila em um campo acústico com baixa pressão durante vários ciclos acústicos, nesse caso a intensidade do ultrassom incidente é menor do que a intensidade de limiar. Nesse tipo de cavitação as bolhas expandem e contraem em torno de um mesmo raio de equilíbrio e possuem longo tempo de vida (ANTUNES, 2022). Para entendermos melhor essa diferenciação, vejamos a figura 12. Notamos que na cavitação instável descrita em (a) temos um colapso mais imediato das bolhas, já na cavitação estável descrita em (b), a bolha demora mais um ciclo de oscilação até o momento de implosão. Essa diferença entre os dois processos se dá através da energia.

Figura 12 – (a) Cavitação acústica instável. (b) Cavitação acústica estável



Fonte: Izadifar *et al* (2019)

O crescimento das bolhas de cavitação depende da intensidade sonora caracterizado na equação 13. O ultrassom de alta intensidade pode expandir a bolha muito rapidamente na fase de rarefação do ciclo que ela nunca será contraída na etapa de compressão. Para o ultrassom de baixa intensidade o tamanho da bolha de cavitação oscila em fases com os ciclos de expansão e compressão. A área superficial da cavidade produzida pelo ultrassom de baixa intensidade é ligeiramente maior durante o ciclo de expansão, se comparado ao ciclo de compressão. Nestes casos, em muitos ciclos as bolhas de cavitação crescem lentamente. Já em frequências altas há um maior número de bolhas, porém elas são menores e possuem um colapso menos energético. O crescimento da bolha pode futuramente chegar a um tamanho crítico, no qual é absorvida uma enorme quantidade de energia das ondas sonoras de alta intensidade. O tamanho crítico depende da frequência do ultrassom. Em 20 kHz, por exemplo, o tamanho crítico é aproximadamente de $170 \mu\text{m}$ de diâmetro. Uma vez que a cavidade aumenta rapidamente, a absorção de energia do ultrassom não é tão eficiente. Sem essa energia absorvida, a bolha não pode mais se sustentar. O líquido avança e a bolha implode, portanto temos a cavitação instável (RONCHI, 2014).

Quando a cavitação acontece em um líquido nos arredores de uma superfície sólida, a natureza do colapso das bolhas muda drasticamente. Em líquidos homogêneos, a cavitação mantém a forma esférica durante o colapso (ver figura 11). Porém, perto da fronteira sólida, o colapso violento da bolha não tem tanta simetria e produz jatos de alta velocidade. Esses jatos, denominados micro-jatos são muito importantes na área da limpeza ultrassônica.

Entre as principais características das bolhas de cavitação, podemos citar a temperatura no momento de implosão das cavidades. Com base em um modelo termodinâmico simples para o

colapso da bolha e assumindo que a compressão adiabática ocorre, a temperatura teórica máxima dentro da bolha (τ_{max}) pode ser calculada usando a seguinte equação

$$\tau_{max} = \tau_o \left[\frac{P_m(\gamma - 1)}{P_v} \right]. \quad (17)$$

O termo τ_o é a temperatura ambiente da solução, P_m é a pressão no líquido (soma da pressão hidrostática e a pressão acústica), $\gamma = \frac{C_P}{C_V}$ é uma relação entre as capacidades caloríficas à pressão e volume constante e P_v é a pressão na bolha em seu maior tamanho. Tal equação superestima (τ_{max}), pois não leva em conta o calor que sai da bolha ou a condutividade térmica dos gases ou até mesmo a energia consumida na decomposição do vapor/gás dentro da bolha (GEVARI et al., 2020).

A transferência de calor pode ser aprimorada por vibração ultrassônica e/ou cavitação acústica. Devido à alta densidade de energia liberada devido ao colapso da bolha no processo de cavitação acústica, ele tem um aprimoramento efetivo da transferência de calor em comparação com a vibração acústica (GEVARI et al., 2020).

4 METODOLOGIA

Para a realização deste trabalho, fizemos um levantamento qualitativo sobre a cavitação acústica e suas aplicações e como o tema está sendo estudado pelos pesquisadores, como plataformas principais, utilizamos o periódicos da CAPES, *Google Scholar*, *Scopus*, *Web of Science* e *Scielo*. Foi utilizado com mais frequência o periódico da CAPES devido a sua gama de resultados, mas isso não nos limitou a não usar outras plataformas de pesquisas, esses outros meios foram úteis como formas de pesquisa complementares. A pesquisa foi feita da seguinte maneira: Foi pesquisado em inglês para a obtenção de resultados mais abrangentes, visando uma quantidade máxima de trabalhos. Nosso foco nas aplicações foi referente aos anos de 2020 até o ano de 2023 para obtermos aplicações mais novas possíveis. Pesquisamos também artigos gerais sobre cavitação, principalmente artigos sobre determinados efeitos e conceitos sobre as áreas biológicas e químicas. Ao todo, analisamos diversos artigos, teses, livros e dissertações acerca do assunto, porém, focamos em 30 artigos sobre aplicações da cavitação acústica nos efeitos físicos, químicos e biológicos, sendo que 12 deles foram referentes aos efeitos físicos, 8 referentes aos fenômenos químicos e 10 deles aos efeitos biológicos. Usamos 4 livros de apoio tanto para a física básica do nosso trabalho, quanto para definições gerais sobre cavitação. Foram investigados por volta de 3 trabalhos entre teses e monografias sobre nosso tema principal e também observamos 10 artigos sobre conceitos químicos, biológicos e artigos de revisão gerais.

Foi pesquisado artigos de revisões mais atuais possíveis sobre o tema e foi observado as referências destes artigos, onde pesquisamos as aplicações mais discutidas na literatura que foram publicadas nos últimos 4 anos. Muitos trabalhos foram pesquisados diretamente nas plataformas, onde foi investigado determinada aplicação e esta aplicação foi analisada. Foi observado uma abrangência gigantesca nos fenômenos físicos, químicos e biológicos da geração de bolhas através do ultrassom, por isso, nos limitamos às aplicações mais discutidas na literatura. Para sintetizar nossa discussão, fizemos uma pesquisa sobre a cavitação acústica e seus fenômenos já discutidos entre os anos de 2020 a 2023 na plataforma do periódicos da CAPES, pois, tal plataforma é dotada de resultados mais abrangentes. Fizemos isso para a cavitação acústica, para os efeitos físicos, efeitos químicos e efeitos biológicos da cavitação acústica e utilizamos alguns parâmetros de pesquisa, o primeiro foi limitar nosso estudo a artigos, livros, teses e dissertações publicadas entre 2020 e 2023 que continham os termos “cavitação acústica”, “cavitação acústica e seus efeitos físicos” “cavitação acústica e seus efeitos químicos” e “cavitação acústica e seus efeitos biológicos” no título e no resumo do trabalho. O segundo parâmetro foi utilizar filtros de pesquisas marcando os anos desejados para obtenção de trabalhos a respeito do objeto de pesquisa que no nosso caso foram os anos de 2020 até 2023 (veja figura 13). O terceiro parâmetro foi pesquisar os efeitos diretamente na plataforma de pesquisa (veja figura 14).

Figura 13 – Pesquisa utilizando os filtros por anos

The screenshot shows a search interface with the query "acoustic cavitation physical effects" and "BUSCA AVANÇADA" (Advanced Search). The left sidebar contains filters: "Filtros ativos" (Active filters) with "Anos: 2020-2023" selected, "Lembrar todos os filtros" (Remember all filters), "Limpar filtros" (Clear filters), "Personalizar meus resultados" (Customize my results) with "Expandir meus resultados" (Expand my results) checked, "Ordenar por" (Sort by) set to "Relevância" (Relevance), "Disponibilidade" (Availability) with "Recurso On-line" (616), "Periódicos revisados por pares" (606), and "Acesso Aberto" (Open Access), and "Tipo de recurso" (Resource type) set to "Artigos" (612). The main results area shows "0 selecionado(s)" (0 selected) and "PÁGINA 1 1-10 of 616 Resultados" (Page 1 1-10 of 616 results). Two articles are visible: 1. "Effects of medium viscoelasticity on bubble collapse strength of interacting polydisperse bubbles" by Qin, Dui; Zou, Qingqin; Zhong, Xianhua; Zhang, Bingyu; Li, Zhangyong. 2. "Estimation of chemical and physical effects of cavitation by analysis of cavitating single bubble dynamics".

Fonte: O autor (2023)

Figura 14 – Pesquisa utilizando os filtros por efeitos

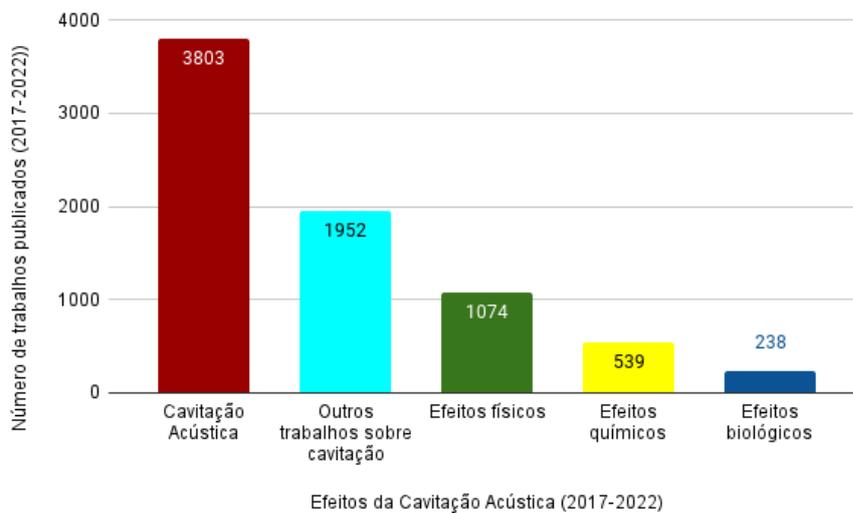
The screenshot shows a search interface with the query "acoustic cavitation acoustic streaming" and "BUSCA AVANÇADA" (Advanced Search). The left sidebar contains filters: "Filtros ativos" (Active filters) with "Anos: 2020-2023" selected, "Lembrar todos os filtros" (Remember all filters), "Limpar filtros" (Clear filters), "Personalizar meus resultados" (Customize my results) with "Expandir meus resultados" (Expand my results) checked, "Ordenar por" (Sort by) set to "Relevância" (Relevance), "Disponibilidade" (Availability) with "Recurso On-line" (136), "Periódicos revisados por pares" (123), and "Acesso Aberto" (Open Access), and "Tipo de recurso" (Resource type) set to "Artigos" (123). The main results area shows "0 selecionado(s)" (0 selected) and "PÁGINA 1 1-10 of 136 Resultados" (Page 1 1-10 of 136 results). Two articles are visible: 1. "Ultrasonic cavitation and acoustic streaming effects during liquid phase separation and dynamic solidification of ternary Al-Sn-Si immiscible alloy" by Wang, B. J.; Wu, W. H.; Liu, J. M.; Zhai, W.; Wei, B. 2. "Simulation of Ultrasonic Induced Cavitation and Acoustic Streaming in Liquid and Solidifying Aluminum" by Riedel, Eric; Liepe, Martin; Scharf, Stefan.

Fonte: O autor (2023)

5 RESULTADOS

De acordo com a nossa pesquisa, vimos que o efeito mais estudado na literatura sobre a cavitação acústica são os efeitos físicos, essa informação fica evidente quando analisamos a figura 15, em que fizemos outra pesquisa, dessa vez referente aos anos de 2017 até 2022. Temos o gráfico representando nossa pesquisa da cavitação acústica nos anos de 2017 até 2022 com um representativo de como cada efeito está sendo pesquisado na literatura.

Figura 15 – Cavitação acústica entre 2017 até 2022

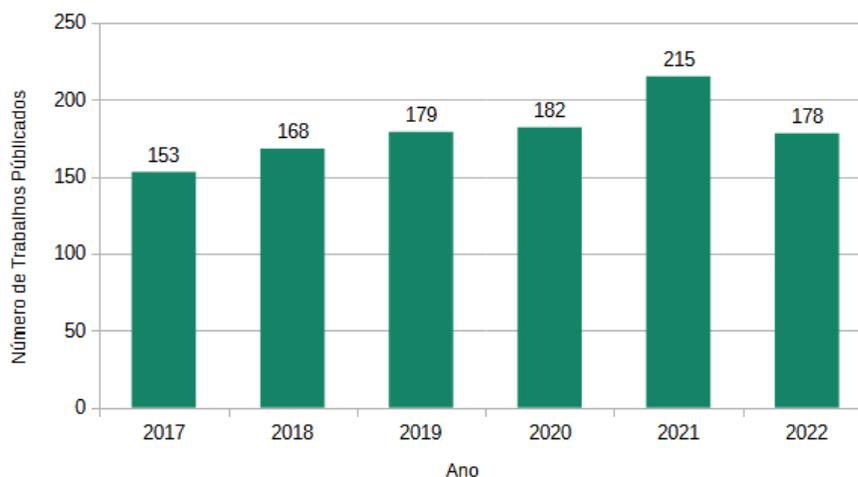


Fonte: Periodicos da Capes (2023)

Os trabalhos em azul claro é referente a estudos gerais sobre cavitação. Ou seja, trabalhos que não falam diretamente dos efeitos mas de aspectos gerais sobre o tema.

Na figura 16, temos a situação dos efeitos físicos da cavitação acústica, onde, observamos que entre os anos de 2017 até 2021 houve uma crescente de trabalhos publicados, porém, tivemos uma oscilação referente ao ano de 2022, pois, quando fizemos essa pesquisa, o ano ainda não tinha terminado, então a tendência é uma crescente nesses efeitos.

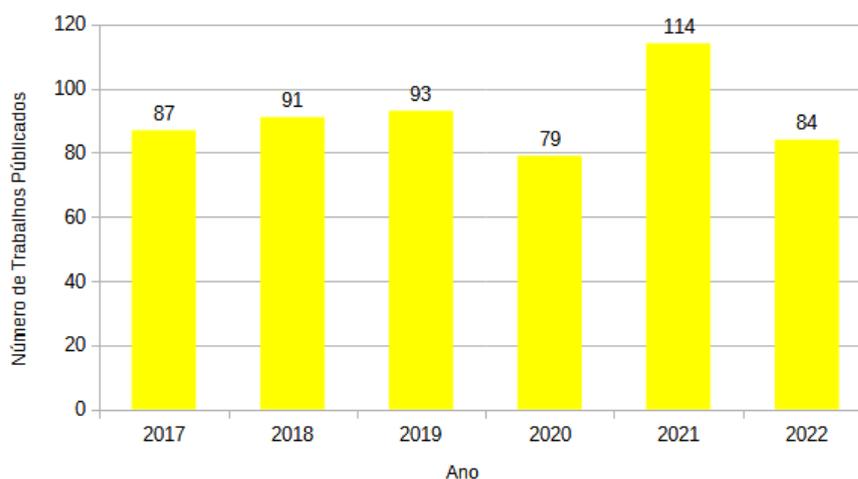
Figura 16 – Cavitação acústica e seus efeitos físicos entre 2017 até 2022



Fonte: Periodicos da Capes (2023)

Na figura 17, vemos o levantamento referente aos efeitos químicos da cavitação acústica, vemos uma oscilação entre os anos de 2019 e 2022.

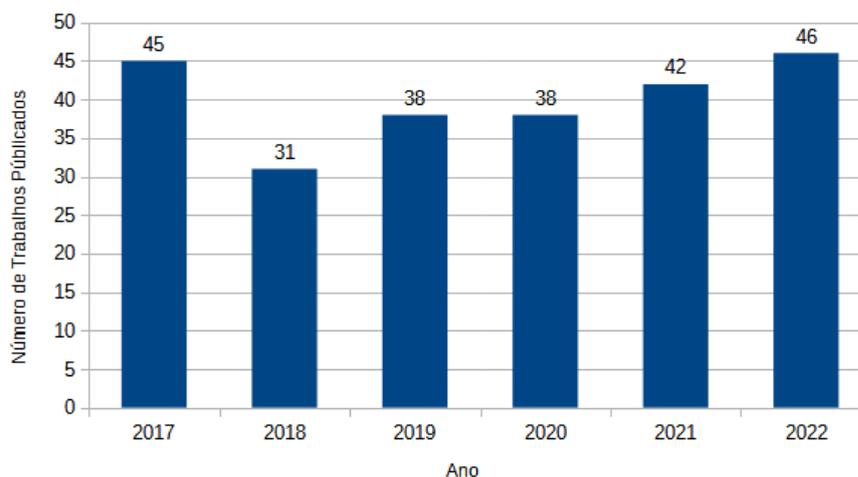
Figura 17 – Cavitação acústica e seus efeitos químicos entre 2017 até 2022



Fonte: Periodicos da Capes (2023)

Na figura 18, observamos como os efeitos biológicos da cavitação acústica estão na literatura, notamos que o efeito está em crescente desde o ano de 2019.

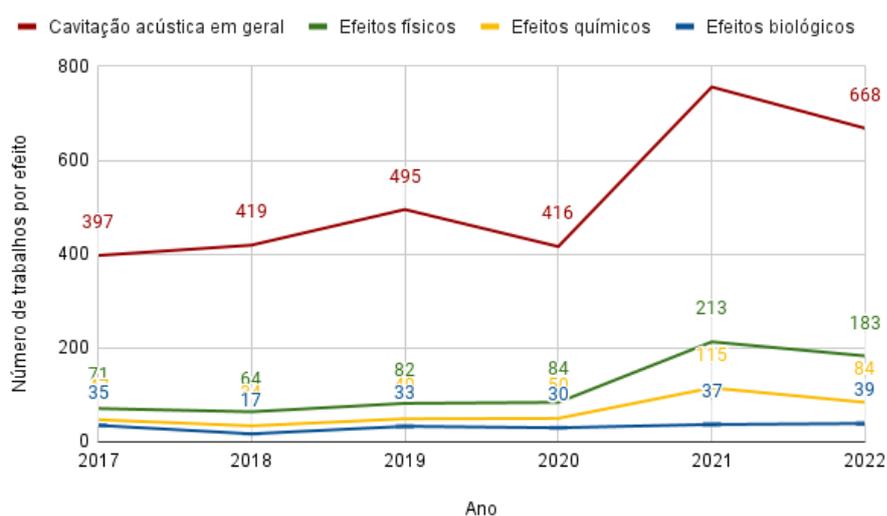
Figura 18 – Cavitação acústica e seus efeitos biológicos entre 2017 até 2022



Fonte: Periodicos da Capes (2023)

Na figura 19, notamos uma tendência de crescimento sobre a cavitação acústica e seus efeitos físicos, químicos e biológicos entre 2017 e 2019, porém, houve um declínio em 2020, seguido de um aumento nas pesquisas em 2021 e uma diminuição nos estudos em 2022.

Figura 19 – Tendências de estudo sobre a cavitação acústica entre 2017 até 2022



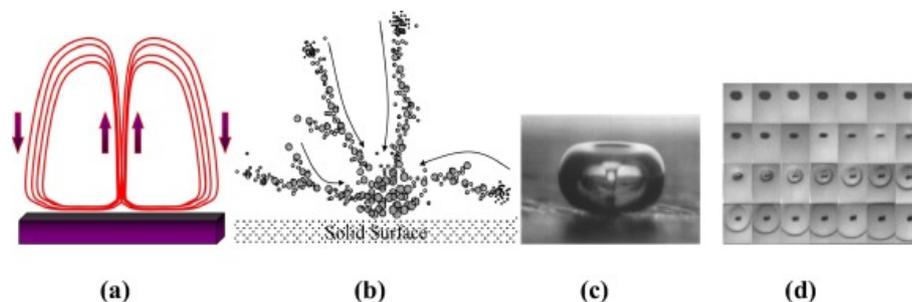
Fonte: Periodicos da Capes (2023)

5.1 EFEITOS FÍSICOS DA CAVITAÇÃO ACÚSTICA

Os principais efeitos físicos analisados neste trabalho foram os efeitos da geração de ondas de choque, *streaming* acústico e microjatos (veja figura 20). Quando as bolhas de cavitação oscilam e colapsam, diversos efeitos físicos são gerados, como, ondas de choque, microjatos, turbulência, forças de cisalhamento, etc. Os efeitos físicos do ultrassom estão sendo usados em

inúmeras aplicações que incluem emulsificação, extração, limpeza, etc (ASHOKKUMAR, 2011). Ainda podemos citar efeitos como aumento da temperatura devido a mudança abrupta de pressão, este efeito, por sua vez está intimamente conectado aos efeitos químicos da cavitação acústica que veremos mais adiante.

Figura 20 – (a) *Streaming* acústico (b) *microstreamers* (c) micro-jatos e (d) ondas de choque



Fonte: Yusof *et al* (2016)

5.1.1 *Streaming* acústico e *Microstreaming*

Quando uma onda acústica senoidal contínua se propaga em um fluido não viscoso, ela força os elementos do fluido a oscilar senoidalmente na direção de propagação da onda; se a velocidade ψ da partícula correspondente de um elemento de fluido for muito menor que a velocidade do som, v_f , no fluido, essa onda acústica é chamada de “onda acústica linear”. Sua principal característica é que o princípio da superposição se mantém durante sua propagação e v_f não é função da frequência da onda acústica. Conseqüentemente, a forma da onda não mudará durante a propagação, e a velocidade de fluxo médio no tempo de um elemento de fluido é zero. Entretanto, quando a amplitude da onda acústica aumenta, a condição acima descrita para o princípio da superposição não é mais válida; esse tipo de onda acústica é chamado de “onda acústica não linear de amplitude finita”. Portanto, a média de tempo da segunda ordem da velocidade oscilatória de cada elemento de fluido tem uma velocidade de componente independente do tempo, além de uma velocidade oscilatória senoidal; esta velocidade é chamada de ‘*streaming* acústico’. Este efeito é gerado devido a uma onda acústica não linear com uma certa amplitude, que se propaga em um fluido viscoso, já que fluidos viscosos comportam cisalhamento, diferente de fluidos não viscosos como a água que não comportam cisalhamento. (WU, 2018). Em outras palavras, este efeito físico pode ser definido como um fluxo constante em um fluido conduzido pela absorção de oscilações acústicas de alta amplitude. Os elementos de volume de fluido de moléculas, são forçados a oscilar na mesma frequência que a onda acústica incidente (WU, 2018). Devido ao movimento do líquido em direções opostas, é gerado um efeito de fluxo acústico (veja a figura 20a) que é acompanhado por efeitos significativos de transferência de massa (YUSOF *et al.*, 2016). Na cavitação acústica, o *streaming* acústico é formado na cavitação estável. Tem sido usado na mistura de fluidos, resfriamento de limite e outras aplicações. As equações básicas incluem a conservação de massa (equação da continuidade) e a equação de

Navier-Stokes da mecânica dos fluidos, respectivamente, são

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{\psi}) = 0, \quad (18)$$

$$\rho \left(\frac{\partial \vec{\psi}}{\partial t} + \vec{\psi} \cdot \nabla \psi \right) = -\nabla \xi + \mu \nabla^2 \psi + \left(\eta + \frac{1}{3} \mu \right) \nabla (\nabla \cdot \vec{\psi}). \quad (19)$$

O termo $\vec{\psi}$ é o vetor de velocidade de fluxo, ξ é a pressão do fluido, η é a massa de cisalhamento do fluido e μ a viscosidade de cisalhamento do fluido; ambos são independentes da densidade ρ . Aqui, assumimos que a propagação da onda é um processo isentrópico/adiabático, ou seja, um processo com entropia constante e sem transferência de calor. Existem basicamente dois tipos de *streaming* acústico. Uma é acelerar o fluxo do fluido contínuo na direção da propagação da onda acústica progressiva. Isso é causado pela perda de intensidade do ultrassom. Em muitos casos, tal atenuação se deve à viscosidade do fluido. Este desequilíbrio da pressão de radiação causa o fluxo de fluido acelerado que é chamado de fluxo de Eckert. O outro tipo é um fluxo semelhante a um vórtice causado por tensão viscosa na camada limite perto de uma parede ou um objeto, independentemente da situação da onda viajante ou estacionária, que é chamado de fluxo de Rayleigh (YASUI, 2018). Quando a ordem de comprimento de onda do *streaming* causado pela tensão viscosa perto da bolha é muito menor que o comprimento de onda acústica, o *streaming* acústico, nesse caso é chamado de '*microstreaming*' (YASUI, 2018). Ou seja, o *streaming* acústico de pequenas escalas em um fluido é chamado de '*microstreaming*' (WU, 2018). O *microstreaming* pode gerar tensões de cisalhamento. Foi observado que a tensão de cisalhamento desempenha o papel dominante, o que pode aumentar a permeabilidade das moléculas passando pelas membranas celulares. Este fenômeno é chamado de 'sonoporação'. Tal aplicação mostrou um grande potencial para a entrega direcionada de DNA, drogas e macromoléculas em uma célula (WU, 2018). A figura 21 mostra o *microstreaming* gerado por microbolhas encapsuladas (EMB) de 10 μm .

Figura 21 – Imagem real do *Microstreaming*



Fonte: Wu (2018)

O efeito do *streaming* acústico foi observado em várias aplicações na literatura como em processos de misturas como estudado por Chen *et al.* Os autores tiveram como objetivo demonstrar um modelo que considera a influência do *streaming* acústico gerado pela propagação de ondas ultrassônicas na hidrodinâmica em um reator de jato impingente confinado (CLJR), que geralmente é usado em uma ampla gama de processos químicos sensíveis à mistura, como produção de nanopartículas e cristalização, como é capaz de fornecer mistura rápida para fluxos de reagentes (CHEN et al., 2023). O fluxo acústico gerado na cavitação é observado no processo de limpeza ultrassônica, como Sahoo *et al* estudaram. Os autores consideram a relação do *streaming* acústico e outros efeitos físicos da cavitação acústica no processo de limpeza de semicondutores (SAHOO et al., 2022). Hu *et al* desenvolveram uma estratégia de resfriamento, que emprega ultrassom focalizado no ar para resfriar pequenas fontes de calor sólido. Foi utilizado o COMSOL *Multiphysics* e o método de elemento finitos para as análises dos resultados computacionais e experimentais. Com a ajuda de um transdutor de *Langevin* comercial, os resultados indicam que o efeito de resfriamento resulta de uma transferência de calor convectiva forçada gerada pelo *streaming* acústico na região focal. Por esse método de resfriamento, o fluxo de calor é aumentado em 150 % e o número de Nusselt (razão entre a transferência de calor por convecção e a transferência de calor por condução) é aproximadamente dobrado para uma fonte de calor elipsoidal feita de fio de platina (Pt) com área superficial de 6,44 mm² e temperatura de 100 °C, em comparação com a convecção natural. É demonstrado experimentalmente que empregar o modo de vibração flexural da lente acústica é crítico no projeto do dispositivo de resfriamento, e aumentar a velocidade de vibração e a frequência de trabalho adequadamente pode melhorar ainda mais o efeito de resfriamento. O uso do *streaming* acústico no processo de transferência de calor em material poroso composto de mudança de fase (PCM). Os resultados mostram que o *streaming* acústico pode melhorar o fluxo de fluido na região da fase líquida e reduzir a diferença da temperatura e a inclinação da frente da interface líquido-sólido. A temperatura média e a fração líquida média não apresentam diferenças óbvias com o aumento do comprimento de onda do *streaming acústico* (LI et al., 2021).

5.1.2 Ondas de choque e Micro-jatos da cavitação

Durante a implosão da bolha de cavitação, pressões na ordem de 200 MPa são geradas. Tais condições, dependendo da natureza do fluido, podem gerar as conhecidas ondas de choque. A formação dessas ondas de choque podem ser muito úteis nas áreas da como sonoquímica, litotripsia, nanomateriais, emulsões e fundição, entre outros (KHAVARI et al., 2021). As ondas de choque que acontecem no correr do colapso da bolha sempre fascinaram os cientistas como uma das forças mais destrutivas da natureza. Como definido, a cavitação é o fenômeno em que bolhas individuais ou nuvens de bolhas oscilam vigorosamente e colapsam violentamente devido a variações de pressão em um líquido. À medida que implodem, as bolhas de cavitação produzem jatos líquidos de alta velocidade acima de 100 m/s e ondas de choque omnidirecionais, ou seja, em todas as direções com picos de pressão locais na faixa de gigapascais (KHAVARI et al., 2021).

A determinação precisa das características da onda de choque é essencial para controlar a eficácia das condições externas de processamento em vários sistemas físicos, químicos e biológicos. O fenômeno das ondas de choque ocorre na cavitação instável. A formação das ondas de choque está relacionada à velocidade do fluido e a velocidade do som. Como tal efeito surge através de uma diferença de pressão do fluido, as ondas de choque dependem do número de *Mach* (M) que é definido pela seguinte equação

$$M = \frac{v_{fluido}}{v_f}. \quad (20)$$

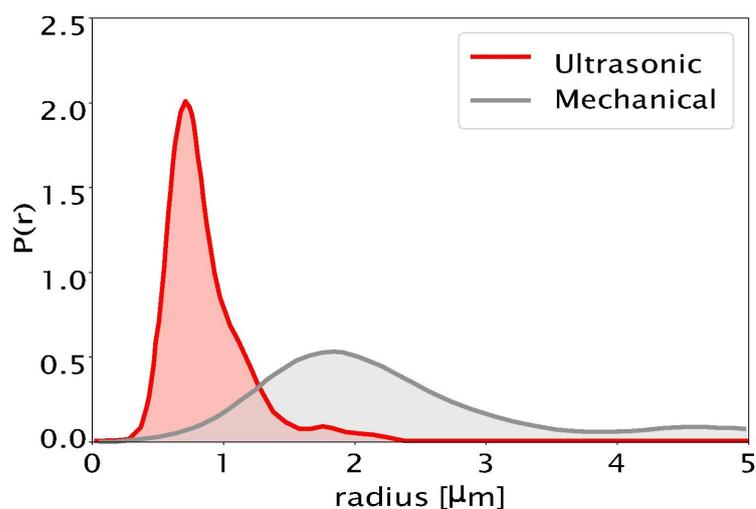
O termo v_{fluido} é referente a velocidade do fluido e v_f é a velocidade do som no fluido. Para uma onda de choque se propagando em um meio homogêneo sob condições de estado estacionário, a velocidade do fluido é normalmente maior que a velocidade do som ($M > 1$) de acordo com as relações de Rankine-Hugoniot (YASUI, 2018). De acordo com algumas simulações numéricas de equações fundamentais da dinâmica dos fluidos dentro de uma bolha em colapso, uma onda de choque esférica é formada, que se propaga para dentro e finalmente se concentra no centro da bolha. Quando uma onda de choque esférica se concentra no centro da bolha, a temperatura aumenta para cerca de 10^6 K ou mais. A figura 20d mostra as ondas de choque em uma fotografia real.

Uma das aplicações mais importantes das ondas de choque formadas no processo de cavitação acústica que foi encontrada na literatura são aplicações relacionadas às emulsões. Mas o que é uma emulsão? Segundo Iida *et al*, uma emulsão é formada quando um líquido se dispersa em outro em forma de gotículas, sendo eles imiscíveis entre si. Isto só é possível na presença de um agente emulsificante e de energia (mecânica ou não) suficiente para que ocorra a dispersão. As emulsões podem ser classificadas em óleo em água (O/A), em que o óleo é a fase dispersa e a água é a fase contínua; e água em óleo (A/O), no qual a água é a fase dispersa e o óleo é a fase contínua. O tipo mais comum de emulsão de petróleo é o de A/O, devido à natureza hidrofóbica dos agentes estabilizantes presentes no petróleo (IIDA *et al.*, 2007). A emulsificação ultrassônica é uma das aplicações que utilizam ondas ultrassônicas. Quando o ultrassom é irradiado na interface entre dois líquidos imiscíveis, a emulsão pode ser rapidamente produzida. Este método é energeticamente mais eficaz do que os outros métodos, como moinho coloidal, agitação mecânica e válvula de borda afiada. Portanto, tal aplicação é amplamente utilizada para muitos finalidades em alimentos e processos químicos. Além disso, a emulsificação ultrassônica tem sido aplicada de forma prática em áreas como farmácia, em que, Ali *et al* desenvolveram um estudo, cujo, o principal objetivo é preparar nanoemulsões usando tecnologia ultrassônica para atender às preocupações de biodisponibilidade do Tadalafil (TAD) que é um inibidor de fosfodiesterase pouco solúvel usado para tratar a disfunção erétil (ALI *et al.*, 2022). As ondas de choque também estão sendo utilizadas na indústria dos alimentos, no qual, Dong *et al*, recentemente abordaram o uso das emulsões ultrassônicas na área de alimentos. O foco foi estudar o mecanismo de emulsificação ultrassônica da proteína de soja isolada (SPI) e investigar a eficiência de emulsões do SPI sob diferentes potências ultrassônicas. (DONG *et al.*, 2023). Oliveira *et al* também

estudaram a utilização dos processos de emulsões inerentes da cavitação acústica em proteínas vegetais. Embora possam ser encontrados relatos na literatura abordando o uso de ultrassom de alta intensidade (HUS) para melhorar as funcionalidades tecnológicas de proteínas de ervilha em diferentes pH (índice de acidez ou basicidade), tais estudos envolveram combinações de potência/tempo de HUS correspondentes a diferentes entradas de energia total. Neste trabalho, é estudado os efeitos das taxas de energia do HUS em concentrados de proteína de ervilha (PPCs), tratados de acordo com os binômios de potência/tempo do HUS. Para todas as propriedades físico-químicas avaliadas, diferentes binômios potência/tempo do HUS desencadearam resultados diferentes, em um determinado pH, indicando que a taxa de aplicação de energia do ultrassom pode ser realmente relevante para o concentrado de proteína de ervilha (PPC) (OLIVEIRA et al., 2020). Collegioni *et al* analisaram a utilização de métodos ultrassônicos no princípio de quebra de emulsões de asfalteno (composto proeminentes no petróleo bruto). Essa substância altamente nociva ao meio ambiente, portanto, é crucial desenvolver tecnologias inovadoras para uma melhor combustão reduzindo as emissões de poluentes associadas à sua utilização. As emulsões de água em óleo contribuem para uma combustão mais ecológica, aumentando a eficiência do carbono e reduzindo as emissões. Neste trabalho, duas emulsões, uma gerada mecanicamente e outra gerada por ultrassom foram comparadas. Os resultados mostraram gotas de água mais finas na emulsão geradas por ultrassom, junto com uma redução na espessura do filme asfáltico. A cavitação acústica proporcionou uma melhor desagregação (quebra das forças intermoleculares) das moléculas de asfalteno. Desse modo, aglomerados menores permitiram estabilizar gotículas de água menores, resultando em uma emulsão ultrafina, que melhora o desempenho de combustão do combustível. Os resultados deste trabalharam tem mais características qualitativas do que quantitativas, por tanto, dados números não foram constatados (COLLEONI et al., 2023). A cavitação acústica permite a formação de emulsões ultrafinas, que se tornam estáveis sem a adição de surfactantes. As gotas são quebradas, provavelmente, pela aplicação de energia para superar a diferença de pressão na interface da emulsão, conhecida como pressão de Laplace. Isso pode ser feito usando altas forças de cisalhamento e velocidades e pressões flutuantes, como no caso das emulsões geradas por ultrassom. Um total de 300 g de emulsões foram preparadas com água na proporção de 80:20 em massa. Foi utilizado um sonificador *Hielsher* U400 equipado com com uma sonda cilíndrica de diâmetro de 1,4 cm e comprimento de 5,3 cm trabalhando em uma frequência de 22 kHz. A sonicação demorou 1 hora dispondo no líquido cerca de dois terços da sonda e impondo ciclos por segundo de 0,4. Os parâmetros foram selecionados de forma a manter a temperatura do sistema abaixo de 60 °C, pois a temperatura aumentou monotonicamente até o valor assintótico devido à entrada de energia. Para o caso da emulsão gerada mecanicamente foi obtida usando um agitador magnético girando a 1200 rpm por 1 h a uma temperatura de 60 °C. A temperatura foi selecionada para reduzir a viscosidade do óleo, permitindo assim uma mistura suave. A distribuição obtida na emulsão gerada por ultrassom é bem mais nítida que aquela gerada mecanicamente, como vemos na figura 22, isto significa que as emulsões geradas por ultrassom tendem a ter gotículas menores. Para estabilizar gotas menores são necessários aglomerados de asfaltenos menores, resultando

na evidente influência da cavitação acústica no tamanho dos aglomerados de asfaltenos. Foi verificado que o tamanho dos aglomerados é de uma ordem de grandeza menor para emulsões ultrassônicas em relação às aquelas geradas mecanicamente. Como a degradação de asfaltenos é um fenômeno causado pela ruptura de forças intermoleculares, foi constatado que tal fenômeno provavelmente foi desencadeado pelos efeitos físicos das ondas de choque e os microjatos, que quebram os aglomerados sem influenciar na estrutura molecular do combustível (COLLEONI et al., 2023).

Figura 22 – Gráfico comparando as emulsões via ultrassom e via meios mecânicos



Fonte: Collegioni *et al* (2022)

As ondas de choque devido à cavitação acústica tem um forte apelo na área de processos clínicos e são fortemente utilizadas no procedimento chamado de litotripsia. A litotripsia consiste em ondas de choque direcionadas para o local onde está o cálculo renal. Elas quebram, implodem a pedra e os fragmentos são eliminados com mais facilidade. Randad *et al* trabalharam no em um projeto que consistia na fabricação e caracterização de transdutores de feixe largo para fragmentação de grandes cálculos renais com litotripsia por onda de explosão. A litotripsia por ondas de choque (SWL) é uma das técnicas de tratamento de cálculo renal mais usado nos processos clínicos, no entanto, tal técnica está sendo cada vez mais substituída pela ureteroscopia devido a preocupações com lesões renais e limitações de eficácia em liberar os cálculos dos pacientes. Diante desse fato, uma nova tecnologia chamada 'litotripsia por ondas de explosão' (BWL), tal procedimento pode evitar as deficiências de SWL usando pulsos de ultrassom senoidais curtos em vez de choques para fragmentar cálculos. Os requisitos de um transdutor BWL de saída de alta pressão, janela acústica limitada, profundidade focal específica e frequência para produzir fragmentos de tamanho aceitável restringem a largura do feixe focal. No entanto, o BWL é mais eficaz com um feixe mais largo que a pedra. Para produzir um feixe largo, o método de espectro angular iterativo (IASA) foi usado para calcular uma tela de fase que foi realizada com uma lente, no qual foi utilizado o MATLAB como software. A técnica não reproduziu com precisão um perfil de feixe alvo quando um perfil axissimétrico foi escolhido. A adição

de funções de ponderação assimétrica ao perfil alvo alcançou a largura de feixe apropriada. As lentes foram projetadas para criar um feixe estreito com foco esférico (6 mm) e um feixe largo (11 mm) com um transdutor de 350 kHz e profundidade focal de 84 mm. Ambas as lentes foram usadas para fragmentar pedras artificiais (11 mm de comprimento) em banho-maria e as taxas de fragmentação foram comparadas. As larguras de feixe largas linearmente simuladas e medidas que eram de 12 mm e 11 mm, respectivamente, com um nulo de 2 mm de largura no centro. As lentes de feixe largo e de feixe estreito fragmentaram $44\pm 9\%$ e $16\pm 4\%$ ($p=0.007$, $N=3$) de uma pedra em peso, respectivamente, na mesma duração e no mesmo pico de pressão negativa. O método ampliou o foco e melhorou a taxa de fragmentação do BWL de pedras grandes (RANDAD et al., 2020). Os estudos da litotripsia utilizando processos acústicos também foram estudados por Chang *et al* (CHANG et al., 2020) e por Galougahi *et al* (GALOUGAHI et al., 2021).

5.2 EFEITOS QUÍMICOS DA CAVITAÇÃO ACÚSTICA

No nosso estudo dos efeitos químicos da cavitação acústica, focamos nos efeitos referentes à aceleração de reações e gerações de radicais livres devido às inúmeras aplicações de tais fenômenos químicos. Mas, também falamos sobre os processos de encapsulação e transferência de massa.

5.2.1 Geração de oxidantes e Aceleração de reação

Transformações químicas e físicas podem ocorrer devido à interação da radiação com a matéria. Então, é importante entender o fenômeno e conhecer o efeito da radiação ultrassônica nestas transformações. O surgimento e futura implosão de microbolhas na cavitação acústica pode proporcionar uma série de efeitos físicos e químicos. Temperaturas altíssimas são geradas no momento de implosão das microbolhas. Diante disso, através de processos de pirólise que é a transformação por aquecimento de uma mistura ou de um composto orgânico em outras substâncias, é possível a geração de agentes químicos que podem trabalhar intensivamente em diversos procedimentos químicos. Esses processos fazem parte da sonoquímica. Sonoquímica é a área da física e da química que utiliza do processo de cavitação acústica para produzir e acelerar reações químicas, fazendo o uso das características de alta temperatura e pressão produzidas a partir da cavitação (GRIESER et al., 2015). Os efeitos químicos da cavitação acústica geralmente ocorrem na cavitação instável, devido ao rápido colapso das bolhas e a rápida liberação de energia mudando rapidamente os parâmetros de pressão do sistema. Os efeitos químicos mais encontrados na literatura foram aqueles referentes a efeitos de aceleração de reação, degradação química e geração de radicais livres.

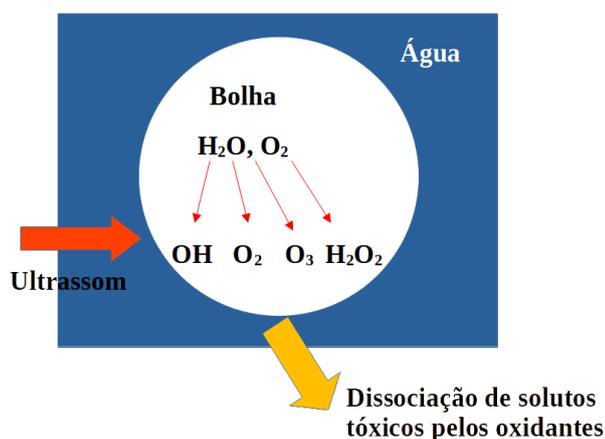
Mas o que é uma reação química? As reações químicas são processos de conversão de uma ou mais espécies químicas em outras novas espécies químicas. Um exemplo muito comum é a oxidação do ferro. A oxidação do ferro é uma reação química em que ocorre a transferência de elétrons entre dois reagentes. Devido a esse processo, ocorre a degradação

inicial do metal e se não houver tratamento, leva ao surgimento de ferrugem e corrosão. E como acelerar uma reação química? Uma das maneiras de acelerar as reações químicas é através de catalisadores. Os catalisadores conseguem acelerar uma reação química porque eles diminuem a energia de ativação, isto é, a energia mínima necessária para que as moléculas colidam de modo eficaz, produzindo o complexo ativado e os produtos. Quanto maior a energia de ativação, mais difícil será para a reação ocorrer. Outra forma de acelerar uma reação é através do aumento da temperatura. E como vimos, o procedimento de cavitação acústica está intimamente ligado ao processo de aumento de temperatura e é esse processo que iremos abordar agora.

No interior aquecido de uma bolha, o vapor de água e o oxigênio, se presentes, são dissociados e oxidantes como radicais OH, H_2O_2 , átomos de O e O_3 são formados (ver figura 14). Os oxidantes se espalham de uma bolha para o líquido circundante e reagem quimicamente com solutos, se presentes. A geração de espécies reativas de oxigênio ocorre devido a elevação da temperatura no interior da bolha, se houver a presença de vapor de água e oxigênio, eles podem se dissociar e formar espécies oxidantes como já citado (ANTUNES, 2022).

O que são radicais livres? De maneira sucinta, o termo radical livre refere-se a átomo ou molécula altamente reativo, que contém número ímpar de elétrons em sua última camada eletrônica (FERREIRA; MATSUBARA, 1997). O oxidante mais dominante nas reações sonoquímicas é geralmente os radicais hidroxila (OH) devido ao fato dos átomos de oxigênio (O) reagirem com a água líquida na parede da bolha como oxigênio (O). (YASUI, 2018).

Figura 23 – Geração de oxidantes



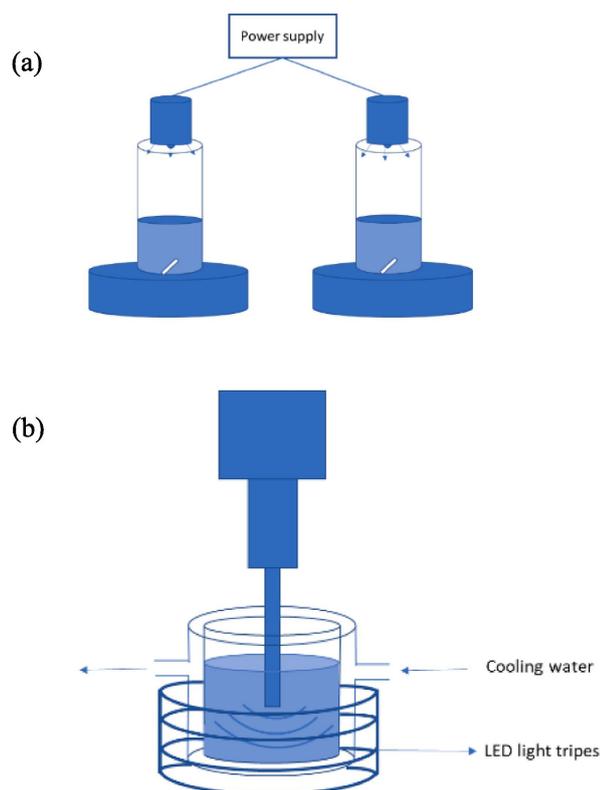
Fonte: O autor (2023)

Para a obtenção de fenômenos químicos como a oxidação, são utilizados métodos conhecidos como Processos Oxidativos Avançados (ou Processos Avançados de Oxidação), conhecidos pela sigla POA's, que são processos que se baseiam na geração de radicais livres, principalmente o radical de hidroxila (OH), que possui alto poder oxidante e pode promover a degradação de vários compostos poluentes eficientemente. Esses processos têm obtido grande atenção devido ao aumento da complexidade e dificuldade no tratamento de águas residuárias, o que tem sido motivo para a busca de novas metodologias visando a remediação desses rejeitos

(FIOREZE et al., 2014). Pang *et al* utilizaram técnicas de degradação química utilizando métodos ultrassônicos. Ésteres ftalatos (PAEs) são comumente usados como plastificantes para melhorar a flexibilidade e trabalhabilidade de materiais poliméricos. Os PAEs podem ser descarregados dos processos de fabricação no meio ambiente e têm sido frequentemente detectados no solo, ar e água. É de conhecimento que o Diisobutil Ftalato (DiBP) e o Ftalato de di-n-butil (DBP) foram os principais PAEs liberados das sacolas de polietileno (PE) (PANG et al., 2022). Como alternativa a esses processos, o uso da degradação fotocatalítica surge como opção viável para o determinado fim. Pois, em soluções aquosas o método de degradação fotocatalítica tem se mostrado eficaz para a remoção de uma variedade de PAEs na água. Ou seja, a utilização de radiação eletromagnética para a aceleração do processo de degradação do composto. Para este trabalho, foi utilizado 1 transdutor tipo chifre que trabalha em uma frequência de 20 kHz e uma potência máxima de 750 W.

O esquema experimental é descrito na figura 24

Figura 24 – Esquema experimental

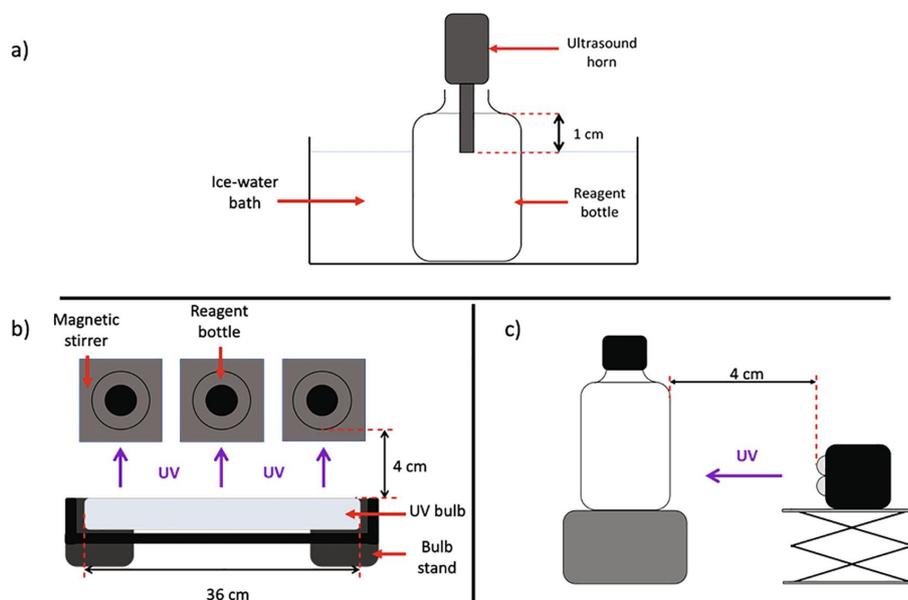


Fonte: Pang *et al* (2022)

Segundo os autores, a obtenção de bons resultados com o processo ultrassônico pode ter sido possível graças aos seguintes fatores: I) a área superficial do catalisador pode ser aumentada devido à ação de dispersão do ultrassom, o que melhora o desempenho. Este aumento perceptível na área de superfície deveria ser atribuído às partículas de catalisador desagregadas por ultrassom, levando a um aumento na área de superfície e na atividade do catalisador (PANG et al., 2022). II) a melhor transferência de massa de compostos orgânicos entre a fase líquida e a superfície

sólida do fotocatalisador pode ser resultado do acoplamento com o processo de cavitação.. Isso foi possível devido ao reabastecimento constante da superfície do TiO_2 pelo efeito da tensão de cisalhamento e do *microstreaming* induzido pela cavitação (PANG et al., 2022). O processo de aprimoramento da fotocatalise também está sendo estudado por outros autores como no trabalho descrito por De-Nasri *et al.* Os autores propuseram um experimento com sondas químicas (a cumarina, no caso) para quantificar indiretamente os radicais OH. Os experimentos com cavitação acústica foram realizados usando uma sonda de ultrassom VCX 500 de 500 W e 20 kHz posicionada dentro dos frascos com tampa de rosca com profundidade de ponta de 1 cm (veja a figura 25a). A ponta da sonda de ultrassom tinha diâmetro de 13 mm e foi operada com 90% de amplitude. Já na figura 16b, vemos detalhes do processo fotocatalítico. Com esses experimentos, foi possível aumentar a produção de radicais OH com o acoplamento acústico à degradação fotocatalítica (DE-NASRI et al., 2021).

Figura 25 – Esquema experimental

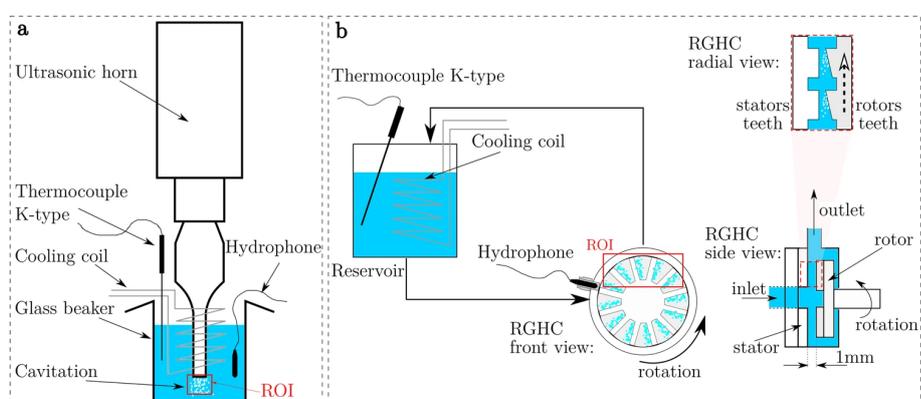


Fonte: De-Nasri *et al* (2021)

Continuando nos processos de degradação com métodos auxiliares, Petkovšek *et al* estudaram o processo de degradação de PVOH considerando uma comparação entre a cavitação acústica e a cavitação hidrodinâmica. O álcool polivinílico (PVOH) solúvel em água é amplamente utilizado nas indústrias e em residências como pastilhas de detergentes (PETKOVŠEK et al., 2023). Foram usadas duas configurações experimentais para comparar o desempenho e as características dos métodos por cavitação acústica e cavitação hidrodinâmica como é visto na figura 26a que mostra o acoplamento do transdutor utilizado na degradação deste experimento. Um transdutor tipo chifre com uma frequência de 20 kHz e uma potência de $p=750$ W foi utilizado, cuja ponta do chifre feito de liga de titânio tem um diâmetro de 12,7 mm, conectado a um gerador de função de especificação não atribuída pelo os autores. Esse transdutor trabalhou em sua maior intensidade com o intuito de obter condições mais fortes e destrutivas para o

tratamento com PVOH. A temperatura constante da amostra durante os experimentos foi mantida por uma serpentina de resfriamento, que foi conectada a um dispositivo de resfriamento portátil externo. Foi utilizado também um tanque de 1 L. Para o equipamento de teste com cavitação hidrodinâmica foi utilizado um rotor visto na figura 26b. O experimento consistiu em um reservatório com volume de 1 L com uma serpentina de resfriamento submersa, conectada ao dispositivo de resfriamento externo, permitindo temperatura de trabalho constante da amostra. Os resultados mostraram que a degradação mecânica das cadeias de PVOH predomina na cavitação acústica. As descobertas deste estudo podem servir como modelo de pesquisa para a degradação de outros polímeros de carbono e fornecer uma rota para melhorar a biodegradação de (PETKOVŠEK et al., 2023).

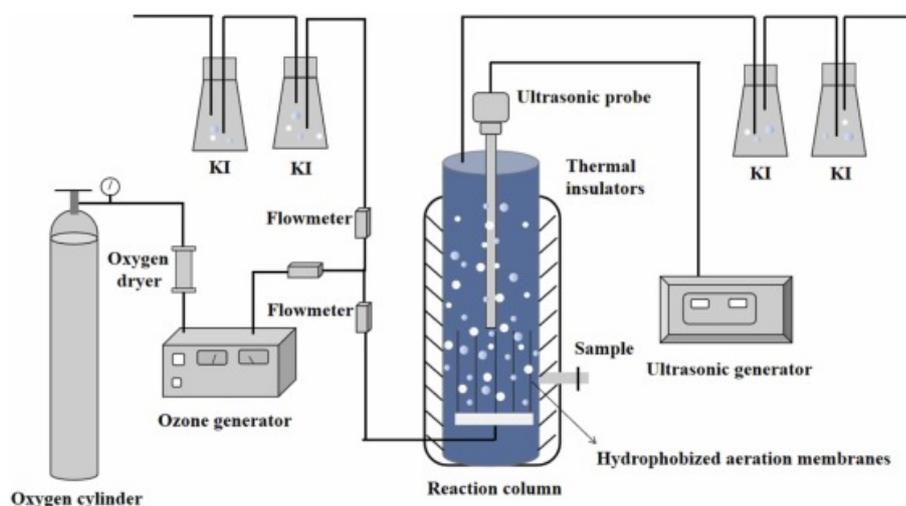
Figura 26 – Procedimento experimental utilizando a cavitação acústica e hidrodinâmica



Fonte: Petkovsek *et al* (2023)

O quadro retangular vermelho apresenta a região de interesse (ROI) capturada pela visualização em alta velocidade. As posições do hidrofone, termômetro e bobina de resfriamento são esquematicamente desenhadas. Zhang *et al* realizaram um procedimento experimental, no qual, a combinação simultânea de cavitação acústica e ozonização de microbolhas (US/O₃) foi aplicada para gerar radicais hidroxila altamente reativos adicionais e, assim, aumentar a degradação de poliacrilamida hidrolisada (HPAM). Para isso, a irradiação ultrassônica da solução HPAM foi realizada por um transdutor em três frequências (20 kHz, 40 kHz, 60 kHz) e potência constante (veja a figura 27a). A maior remoção de HPAM (97,35%) ocorreu na frequência de 20 kHz após 60 min. As curvas de degradação da irradiação ultrassônica do HPAM seguiram a cinética de primeira ordem. Comparado com os dois métodos de processo de degradação separados, o método acoplado com o transdutor exerce um efeito sinérgico na composição do HPAM, com um fator de aumento de 1,50 (ZHANG et al., 2022a).

Figura 27 – Procedimento experimental



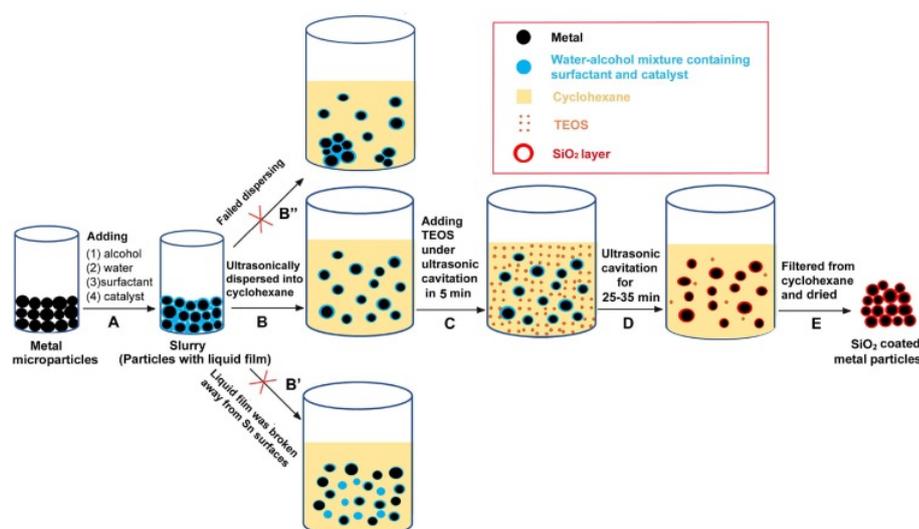
Fonte: Zhang *et al* (2022)

5.2.2 Encapsulação

O processo de encapsulação e de micro encapsulação também estão sendo discutidos na literatura em relação aos fenômenos químicos da cavitação acústica. Mas do que se trata a encapsulação? A encapsulação é um processo pelo qual um material ou mistura de materiais é revestido ou aprisionado dentro de outro material ou sistema. O material que é revestido ou aprisionado é em grande parte das vezes um líquido, mas pode ser uma partícula sólida ou gás e é conhecido por vários nomes, como material de núcleo, carga útil, ativos, preenchimento ou fase interna. O material que constitui o revestimento é referido como material de parede, suporte, membrana, invólucro ou revestimento. A encapsulação é utilizada em vários setores diferentes com uma ampla variedade de técnicas ou processos disponíveis (RISCH, 1995).

Tian *et al* desenvolveram um método de sol-gel confinado por interface, assistido por ultrassom, propondo o encapsulamento rápido de micropartículas de metal em SiO_2 , e o encapsulamento de micropartículas de estanho (Sn) é escolhido como um exemplo para ilustrar sua viabilidade. O método proposto envolve o recobrimento de micropartículas metálicas com filmes líquidos contendo água, álcool, surfactante (Span-80) e catalisador (NH_4F) e a seguir dispersão ultrassônica dessas partículas em ciclohexano, que é adicionado tetraetilortosilicato (TEOS). Foi verificado que o auxílio da sonda sonicação e a adição de surfactante foram cruciais para a obtenção de uma boa dispersão de micropartículas de metal em ciclohexano. E usando álcool de alta viscosidade, neste caso o glicerol, controlando a proporção de volume de água para álcool e a quantidade de água e escolhendo uma potência ultrassônica adequada são essenciais para evitar a formação de SiO_2 , livre (ou seja, SiO_2 , que não é revestido nas partículas), o que resulta em que os filmes líquidos escapam das superfícies das partículas sob cavitação acústica. Para o procedimento ultrassônico, foi utilizado um sistema ultrassônico com os seus respectivos parâmetros de frequência e potência: $f=20$ kHz e $p=1080$ W, sob um intervalo de 3s a cada 2s de trabalho (TIAN *et al.*, 2021). O aparato experimental pode ser visto na figura a seguir:

Figura 28 – Aparato experimental



Fonte: Tian *et al* (2022)

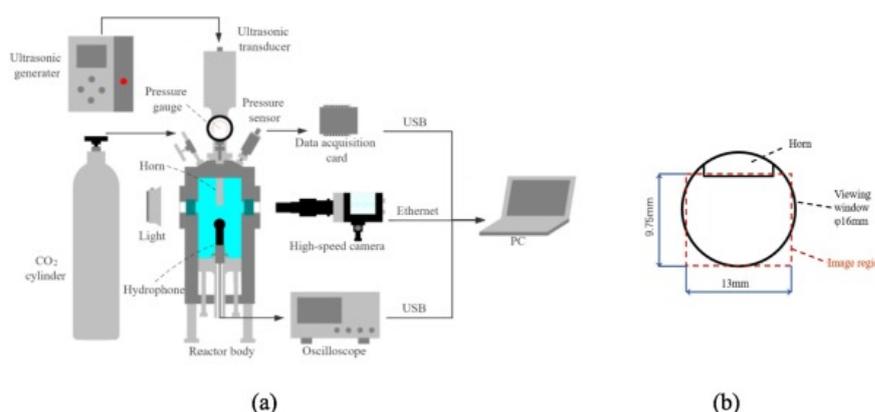
Em (a) na figura 28 é mostrado o processo de adição das micropartículas de metal (estanho) com álcool, água, surfactantes e catalisador. Já em (b), a mistura é ultrassonicamente dispersa em ciclohexano, em (b') é mostrado uma falha na dispersão e em (b'') é mostrado que o filme líquido foi quebrado longe das superfícies estanho (sn). Em (c), foi disperso essas partículas de metal por ultrassom por 5 minutos em ciclohexano, é adicionado tetraetilortossilicato (TEOS). Em (d), o experimento ficou em um processo de cavitação acústica por cerca de 25-35 minutos. Por fim, em (e) foi obtido as partículas de metal revestidas de SiO₂ (TIAN et al., 2021). Os resultados também revelaram que a espessura da camada de SiO₂ pode ser ajustada alterando o tempo de reação ou a quantidade total de água. Em particular, a espessura da camada de SiO₂ pode ser facilmente aumentada simplesmente repetindo o procedimento de encapsulamento. Comparado com os métodos tradicionais baseados no processo Stober, o método proposto economiza tempo (tempo de reação: cerca de 30 min vs. mais de 12 h) e extremamente eficaz para revestir micropartículas com uma camada contínua e uniforme de SiO₂ com a espessura desejada (TIAN et al., 2021). A utilização da encapsulação também foi verificada por Silva *et al*. Neste trabalho, foi utilizado a cavitação acústica para fins alimentícios. Foi utilizado a encapsulação de nutracêuticos em Iogurtes e bebidas utilizando tecnologias de processamento por ultrassom e alta pressão (SILVA et al., 2022).

5.2.3 Transferência de massa

Efeitos da cavitação acústica também podem ser atribuídos nos processos de transferência de massa. Quando um sistema, dois ou mais componentes na qual as concentrações variam de ponto a ponto, há uma tendência natural da massa ser transferida, minimizando as diferenças de concentração entre os sistemas. O transporte de um constituinte de uma região de alta concentração para aquela de menor concentração é chamado de transferência de massa

(LUPORINI, 2005). Em um estudo feito por Gao *et al*, foi relatado como é possível aumentar a velocidade de transferência de massa através de processos com cavitação acústica com a adição de N-dimetilformamida (DMF) expandida com CO₂. Neste artigo, o desenvolvimento da estrutura de nuvem de bolhas de cavitação em N, N-dimetilformamida (DMF) expandida com CO₂ foi observado por uma câmera de alta velocidade e a intensidade da cavitação foi registrada usando um hidrofone esférico. Verificou-se que a magnitude da energia de cavitação instável não estava apenas relacionada à potência de entrada, mas também intimamente relacionada ao conteúdo de CO₂. Foi usado um transdutor tipo chifre de 63 mm de comprimento total, ponta de 13 mm de diâmetro e frequência operacional de 20 kHz. Este dispositivo foi usado para induzir oscilações ultrassônicas em N-dimethylformamide (DMF) expandido com CO₂ no líquido. A potência ultrassônica no experimento pode ser regulada de 900 W a 0 kW de acordo com os requisitos experimentais (GAO et al., 2021). O aparato experimental pode ser observado na figura a seguir 29

Figura 29 – Aparato experimental



Fonte: Gao *et al* (2021)

Na figura 29a é mostrada a configuração experimental para observação do fenômeno de ultrassom e medição de pressão sonora em DMF expandido com CO₂. Em (b) é mostrado a posição e tamanho das imagens capturadas na janela de visualização. A cavitação no sistema gás líquido de expansão (GXL) é muito afetada pelo conteúdo de gás, e a maneira simples de aumentar a pressão estática e aumentar a intensidade da cavitação não pode ser usada para tratar o problema de cavitação no sistema GXL. Quando a quantidade de solvente orgânico é a mesma, maior pressão do sistema significa mais conteúdo de gás e, portanto, menor tensão superficial (efeito que ocorre na camada superficial de um líquido que leva a sua superfície a se comportar como uma membrana elástica), viscosidade (atrito interno dos fluidos) e densidade do líquido, causando o aumento da população de bolhas de cavitação e a redução de sua estabilidade. A diminuição da velocidade do jato de cavitação transiente causada pela diminuição da tensão superficial e o efeito de blindagem causado pelo aumento do número de bolhas também se tornaram fatores negativos para a propagação do jato de cavitação instável. Do outro ponto de vista, a rápida alternância da fase de rarefação e compressão do ultrassom faz com que o conteúdo

de dióxido de carbono no líquido muda rapidamente devido à rápida mudança de saturação, o que promove muito a velocidade de transferência de massa em GXL; A rápida formação e colapso da nuvem de bolha de cavitação (CBC) e sua violenta oscilação também intensificaram a velocidade da transferência de massa. A rápida formação e colapso do CBC e sua violenta oscilação também intensificaram a velocidade da transferência de massa; O GXL por si só pode reduzir a viscosidade de solventes orgânicos e tem a propriedade de promover a transferência de massa. Todos os itens acima indicam que a combinação de ultrassom com GXL pode criar uma excelente plataforma para transferência de massa eficiente. Isso é especialmente útil para a fabricação de pós ultrafinos (GAO et al., 2021). A utilização da cavitação acústica para o aumento da transferência de massa também foi verificada por Zhang *et al.*, que foi proposto um novo método de aprimoramento ultrassônico para microrreator de gotículas (ferramentas poderosas para sintetizar produtos químicos, nano materiais e biomoléculas) e foi relatado que o efeito de bolhas dentro de microgotículas pela primeira vez. Com base nisso, a síntese de nanocristais AgInS_2 é selecionada como reação modelo para estudar o mecanismo de aprimoramento. Isto é, descobriram que o campo de fluxo em microgotas é significativamente melhorado devido aos efeitos físicos que já vimos aqui neste trabalho, o *streaming* acústico e ao *microstreaming* de cavitação. Por consequência, o coeficiente de transferência de massa é aumentado em 72,5% e AgInS_2 nanocristais são sintetizados com sucesso com tamanho de partícula menor e mais uniforme, bem como mais ajustável desempenho em comparação com nenhuma condição de radiação ultrassônica. Este trabalho fornece um novo método e uma visão profunda do microrreator de gotículas aprimoradas por ultrassom, permitindo a produção contínua de síntese química fina (ZHANG et al., 2022b).

5.3 EFEITOS BIOLÓGICOS DA CAVITAÇÃO ACÚSTICA

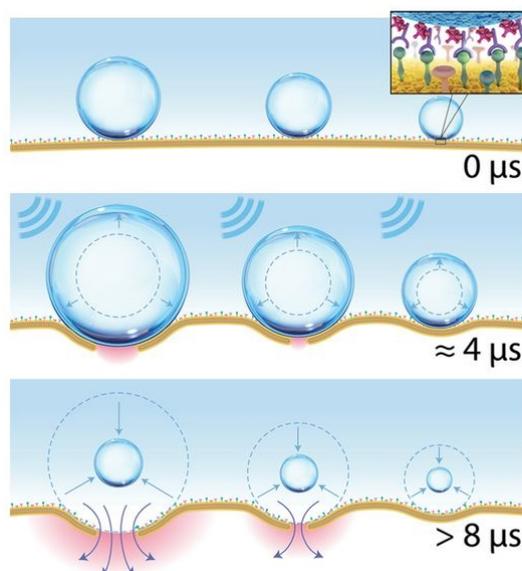
Nos efeitos biológicos, discutimos os efeitos da sonoporação, eliminação de fungos e bactérias e a viabilidade celular. Abordamos esses fenômenos por serem os mais discutidos na literatura.

5.3.1 Sonoporação

O processo de sonoporação se trata da abertura de microporos na região celular para facilitação de entradas de bioagentes moleculares, isso foi discutido antes pois o método da sonoporação está totalmente ligado aos efeitos físicos do *streaming* acústico/*microstreaming* (ver a figura 30). Brevemente vimos como o processo de sonoporação facilita outro procedimento biológico chamado de *drug delivery*, na tradução livre 'entrega de drogas'. Os efeitos biológicos aplicados nos trabalhos foram realizados *in vivo* que se refere aos estudos realizados com organismos vivos e *in vitro* que se refere aos estudos realizados fora de um organismo vivo. A sonoporação foi utilizada por Park *et al.* Foi observado a utilização da abertura de microporos devido a efeitos físicos da cavitação acústica no estudo de lipossomas ecogênicos. Agentes de contraste de ultrassom (UCAs), que são grupos de microbolhas projetadas para aprimorar o

contraste da imagem de ultrassom por respostas lineares e não lineares a um campo acústico incidente, foram recentemente estudados para aplicações de *drug delivery*, pois, como vimos, a cavitação de bolhas pode aumentar a permeabilidade temporária de células próximas. No entanto, o volume interno dos UCAs é geralmente preenchido com gás, portanto, o carregamento de moléculas de drogas nos UCAs é limitado. Neste estudo, um lipossoma ecogênico com um núcleo líquido e gasoso é proposto como um carreador alternativo de material genético para administração de fármacos mediada por ultrassom. Foi observado que a liberação de siRNA dos lipossomas pode ser alcançada com sucesso com sonicação de ultrassom de 1 W/cm^2 a 1 MHz; parâmetros baixos o suficiente para serem usados em sistemas terapêuticos genéricos de ultrassom. Assim, efeitos físicos como *microstreaming* e forças de cisalhamento foram de grande importância para o processo de síntese de lipossomas ecogênicos para sonoporação (PARK et al., 2022).

Figura 30 – Ilustração do fenômeno da sonoporação



Fonte: Fan *et al* (2012)

A sonoporação está sendo usada, frequentemente como um método alternativo para o tratamento de doenças, principalmente pelo o fato de que a radiação inerente das ondas acústicas não é um tipo de radiação que é nociva aos tecidos biológicos tal qual certas faixas de frequências de ondas eletromagnéticas. Uma boa parte dos estudos pré-clínicos da utilização do *microstreaming* estão concentrados em tratamentos de tumores/câncer de órgãos e tecidos que podem ser tratados pelo o *streaming* acústico formado devido a cavitação acústica, o crescente conhecimento dos mecanismos celulares e moleculares para doença humana permite que a sonoporação se torne uma alternativa terapêutica promissora. A sonoporação para gene *site-specific* (ambiente e com um espaço determinado) ou entrega de drogas usando as microbolhas encapsuladas (EMBs) tem sido extensivamente estudada em células *in vitro* (WU, 2018). Trabalhos recentes como o estudo feito por Li *et al*, em que, foi abordado a utilização do fenômeno da sonoporação,

em especial, os processos utilizando ultrassom focalizado de baixa intensidade (LIFU) para a geração de ‘nanobombas’ com o objetivo de explodir células com tumor (LI et al., 2022). Em um outro estudo, feito por Xie *et al*, os autores descrevem uma nanopartícula sensível a radiação acústica e revestida por membrana de eritrócitos, que pode induzir infarto do trombo tumoral ao danificar precisamente o endotélio vascular do tumor. Essas nanopartículas, quando sujeitas à radiação acústica podem sofrer transição de fase acústica e cavitação intensa com resposta ao ultrassom focalizado de baixa intensidade (LIFU), danificando o endotélio vascular tumoral, iniciando rapidamente a cascata de coagulação e formando tromboembolismo nos vasos tumorais (XIE et al., 2022). Essa contextualização fica evidente em um trabalho discutido por Tang *et al*, no qual, foi relatado a capacidade de aumentar a perfusão sanguínea do tumor e a entrega de doxorubicina (Dox) usando um novo efeito de sononeoperfusão causando um efeito de cavitação na perfusão tumoral em tumores Walker-256 subcutâneos de ratos usando microbolhas estimuladas por ultrassom (USMB). Para induzir o efeito de sononeoperfusão, o tratamento com USMB foi realizado com um sistema de ultrassom de diagnóstico (DUS) modificado e microbolhas. O pulso terapêutico foi operado com pressão negativa de pico de 0,26 a 0,32 MPa e frequência de repetição de pulso (PRF) de 50 Hz a 2 kHz. Ultrassom com contraste (CEUS) foi usado para avaliação da perfusão tumoral. O tratamento com USMB de 0,26 MPa e 1 kHz pode aumentar significativamente a perfusão do tumor com um aumento de 20,29% na intensidade do pico CEUS e um incremento de 21,42% na área de perfusão por mais de 4 horas (P <0,05). Portanto, tal técnica, pode ser um novo método físico para superar o efeito terapêutico resistência de tumores hipoperfundidos ou hipóxicos (TANG et al., 2023).

5.3.2 Eliminação de fungos e bactérias e a viabilidade celular

Recentemente, o ultrassom está sendo explorado no combate a microrganismos patogênicos e bactérias resistentes a medicamentos. Na maioria dos estudos, utiliza-se radiação ultrassônica de baixa frequência ou focalizada de alta intensidade. Nishiguchi *et al* estudaram a inativação de microrganismos como bactérias, fungos, algas e plânctons usando ondas ultrassônicas. Foi analisado as espécies de *Escherichia coli* (*E. coli*), *Saccharomyces cerevisiae* (*S. cerevisiae*) e *Bacillus subtilis* (*B. subtilis*) como teste. A inativação foi tentada por irradiação ultrassônica em frequências de 20 kHz a 4,4 MHz e potência acústica de 10 W. Diferentes dependências de frequência da inativação foram confirmadas em *E. coli*, *S. cerevisiae* e *B. subtilis*. Com base nesses dados, o mecanismo de inativação do microrganismo é discutido com foco nas características celulares (NISHIGUCHI et al., 2021). Já na área de saúde/medicamentos, Abramova *et al* desenvolveram um processo de eliminação bacteriana nas propriedades do algodão com óxido de cério (CeO₂) com a adição da cavitação acústica, o que traz grande contribuição a nível medicinal (ABRAMOVA et al., 2021). Sviridov *et al* analisaram o efeito antibacteriano da cavitação acústica promovida por mesoporos nanopartículas de silício. Neste trabalho, nanopartículas mesoporosas de silício preparadas, que foram sintetizadas por corrosão eletroquímica de *wafers* de silício cristalino seguidas de moagem de alta energia em água, foram

exploradas como um sonossensibilizador em meio aquoso sob irradiação com ultrassom de baixa intensidade a 0,88 MHz. Devido ao revestimento misto de óxido-hidreto das superfícies das nanopartículas, elas mostraram estabilidade coloidal aceitável e sonossensibilização da cavitação acústica. Testes *in vitro* com *Lactobacillus casei* revelaram uma queda dramática da viabilidade bacteriana e dano das células após irradiação ultrassônica com intensidade de cerca de 1 W/cm² na presença de nanopartículas, que são quase não tóxicas nas concentrações estudadas de cerca de 1 mg/mL. Os resultados experimentais provam que bolhas de cavitação sensibilizadas por nanopartículas nas proximidades de bactérias podem causar lise bacteriana e morte. As propriedades sonossensibilizantes de nanopartículas de silício mesoporosas recém-preparadas são benéficas para sua aplicação em terapia antibacteriana e tratamento de meios líquidos (SVIRIDOV et al., 2023).

A viabilidade celular é um outro efeito biológico que foi avaliado por diversos autores. Levario-Diaz *et al* avaliaram a viabilidade celular e o metabolismo celular de células de câncer cervical (HeLa) utilizando ondas estacionárias (ondas que são formadas quando duas ondas, propagando-se em direções opostas, encontram-se). Neste trabalho, foi relatado um estudo sistemático empregando um dispositivo de captura acústica ressonante 1D para avaliar a viabilidade celular e o metabolismo celular para uma linha celular saudável (fibroblastos dérmicos humanos, HDF) e uma linha celular de câncer cervical (HeLa), em função do tempo e tensões aplicadas (4–10 V_{pp}) sob condições de temperatura controlada. Foi demonstrado que a alta viabilidade celular pode ser alcançada de forma confiável quando o dispositivo é operado em sua tensão de captura mínima e sintonizado cuidadosamente para maximizar o campo acústico de onda estacionária na ressonância da cavidade. Os autores descobriram que a viabilidade celular e o metabolismo reductivo para ambas as linhagens celulares são mantidos próximos dos níveis de controle à temperatura ambiente e a 34°C após 15 minutos de exposição acústica mantendo o dispositivo acústico a uma frequência de 6,77 MHz, enquanto exposições acústicas mais curtas e pequenas mudanças na temperatura e voltagens tiveram efeitos prejudiciais nas células (LEVARIO-DIAZ et al., 2020). Peralta *et al* utilizaram processos de banho ultrassônico (UB) e sonda ultrassônica (UP) para avaliar a viabilidade celular de *Lacticaseibacillus paracasei* 90 (L90). Além da viabilidade celular, a culturabilidade, arquitetura, atividade enzimática e potencial metabólico também foram avaliados. Foram realizados três diferentes tratamentos ultrassônicos: UB: um ciclo de sonicação usando um banho ultrassônico (40 kHz, 5 °C, 1 h); UP3: três ciclos de 1 min de sonicação (40 W, amplitude de 50%, 4 °C) e 1 min de resfriamento em gelo após cada ciclo, usando uma sonda ultrassônica de 20 kHz (UP) com ponta de 13 mm de diâmetro; e UP6: o mesmo descrito para UP3, mas com seis ciclos de 1 minuto de sonicação. No geral, o processo de viabilidade celular de L90 foi alcançada nos parâmetros ultrassônicos supracitados anteriormente (PERALTA et al., 2022). O efeito da viabilidade celular também foi avaliado por Moghaddam *et al*. Os autores tratam dos efeitos da viabilidade e da colonização celular no processo da cavitação acústica nas células-tronco de espermatogônia do camundongo. Para tais fins, foi avaliado um termo chamado “índice mecânico”. O experimento foi realizado com um transdutor de 40 kHz e intensidade ultrassônica entre 0,28-1.34 W/cm₂. Células-tronco

espermatogônias foram estimuladas por ultrassom de baixa intensidade a uma frequência de 40 kHz por 5 dias e a colonização e viabilidade avaliadas no sétimo dia. Os resultados sugerem que um ultrassom de baixa intensidade de 40 kHz com um índice mecânico de 0,40 pode ser eficaz no aumento da proliferação e colonização de espermatogônias em células-tronco durante o cultivo (MOGHADDAM et al., 2021).

6 CONCLUSÃO

Este trabalho teve como finalidade estudar a cavitação acústica e seus efeitos físicos, químicos e biológicos mostrando as principais aplicações nos últimos 4 anos, introduzindo os conceitos mais básicos com tudo que já foi encontrado na literatura, explicando o conceito de ondas, transdutores de *Langevin* e cavitação acústica. Utilizamos as plataformas de pesquisa de periódicos da CAPES, *Google Scholar*, *Web of Science*, *Scopus* e *scielo*, e fizemos a pesquisa nos parâmetros descritos na metodologia. Foi verificado que os efeitos mais encontrados e estudados nos sites para a revisão foram os efeitos físicos da cavitação acústica. Ao todo, falamos dos principais efeitos físicos, químicos e biológicos encontrados nas pesquisas durante os últimos 4 anos, entre eles o *streaming* acústico, *microstreaming*, ondas de choque, geração de radicais livres e aceleração de reação, encapsulação, transferência de massa, sonoporação, eliminação de fungos e bactérias, e a viabilidade celular. Paralelo a esse processo, detalhamos as aplicações dos efeitos físicos, químicos e biológicos a fim de realizar uma análise quantitativa sobre o tema em questão em quase meia década de estudos. Foi observado que a cavitação acústica tem resultados promissores nos próximos anos devido a quantidade de estudos que estão sendo realizados na área. Foi notado que o processo de geração de bolhas através do ultrassom está sendo muito utilizado como métodos complementares para a realização de um experimento, o que sugere que ele sirva como método substituto para outras formas de fazer tal atividade, já que provamos que o método ultrassônico pode ser mais eficaz que outros meios. Vimos que os efeitos químicos têm grandes aplicabilidades em diversos processos, principalmente em processos híbridos. Também é observado que os efeitos biológicos, por mais que sejam menos estudados nos últimos anos, há muita esperança que suas aplicações sejam mais abundantes nos próximos anos, sobretudo na área celular.

REFERÊNCIAS

- ABRAMOVA, A. V.; ABRAMOV, V. O.; FEDULOV, I. S.; BARANCHIKOV, A. E.; KOZLOV, D. A.; VESELOVA, V. O.; KAMENEVA, S. V.; IVANOV, V. K.; CRAVOTTO, G. Strong antibacterial properties of cotton fabrics coated with ceria nanoparticles under high-power ultrasound. **Nanomaterials**, MDPI, v. 11, n. 10, p. 2704, 2021.
- ALI, H. S.; AHMED, S. A.; ALQURSHI, A. A.; ALALAWI, A. M.; SHEHATA, A. M.; ALAHMADI, Y. M. Boosting tadalafil bioavailability via sono-assisted nano-emulsion-based oral jellies: Box-behnken optimization and assessment. **Pharmaceutics**, MDPI, v. 14, n. 12, p. 2592, 2022.
- ANTUNES, C. A. **Sobre as condições e probabilidades para a nucleação e cavitação acústicas no tecido biológico-uma análise teórica**. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2022.
- ASHOKKUMAR, M. The characterization of acoustic cavitation bubbles—an overview. **Ultrasonics sonochemistry**, Elsevier, v. 18, n. 4, p. 864–872, 2011.
- BORGES, R. **Introdução a Física Acústica**. São Paulo: Livraria da Física, 2017.
- CHANG, T.-H.; LIN, W.-R.; TSAI, W.-K.; CHIANG, P.-K.; CHEN, M.; TSENG, J.-S.; CHIU, A. W. Comparison of ultrasound-assisted and pure fluoroscopy-guided extracorporeal shockwave lithotripsy for renal stones. **BMC urology**, BioMed Central, v. 20, n. 1, p. 1–7, 2020.
- CHEN, L.; DU, Q.; GUO, Y.; YANG, X.; CHEN, B. Numerical modelling of effects of ultrasound-induced acoustic streaming on hydrodynamics in a confined impinging jet reactor using a non-linear model based on local velocity fluctuation. **Chemical Engineering and Processing-Process Intensification**, Elsevier, v. 183, p. 109253, 2023.
- COLLEONI, E.; VICICONTE, G.; CANCIANI, C.; SAXENA, S.; GUIDA, P.; ROBERTS, W. L. Sonoprocessing of oil: Asphaltene declustering behind fine ultrasonic emulsions. **Ultrasonics Sonochemistry**, Elsevier, p. 106476, 2023.
- COSTA, M. S. **Modelagem numérica de transdutores de Langevin para aplicações industriais**. 95 f. Monografia (Graduação) — Universidade Federal de Alagoas, Arapiaraca, 2022.
- DE-NASRI, S. J.; NAGARAJAN, S.; ROBERTSON, P. K.; RANADE, V. V. Quantification of hydroxyl radicals in photocatalysis and acoustic cavitation: Utility of coumarin as a chemical probe. **Chemical Engineering Journal**, Elsevier, v. 420, p. 127560, 2021.
- DONG; XIAO BIN, Z.; SHIQI. Mechanistic analysis and application of ultrasonic emulsification of soy protein isolate. **Shípín kēxué**, China Food Publishing Company, v. 44, n. 9, p. 32–38, 2023.
- FERREIRA, A.; MATSUBARA, L. Radicais livres: conceitos, doenças relacionadas, sistema de defesa e estresse oxidativo. **Revista da associação médica brasileira**, SciELO Brasil, v. 43, p. 61–68, 1997.
- FIGLIORINI, M.; SANTOS, E. P. dos; SCHMACHTENBERG, N. Processos oxidativos avançados: fundamentos e aplicação ambiental. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, p. 79–91, 2014.

GALOUGAHI, K. K.; PATEL, S.; SHLOFMITZ, R. A.; MAEHARA, A.; KEREIAKES, D. J.; HILL, J. M.; STONE, G. W.; ALI, Z. A. Calcific plaque modification by acoustic shock waves: intravascular lithotripsy in coronary interventions. **Circulation: Cardiovascular Interventions**, Am Heart Assoc, v. 14, n. 1, p. e009354, 2021.

GAO, H.; PEI, K.; LEI, D.; HU, G.; CHAO, Y.; MENG, A.; WANG, H.; SHENTU, W. Ultrasonic cavitation in co₂-expanded n, n-dimethylformamide (dmf). **Ultrasonics Sonochemistry**, Elsevier, v. 78, p. 105713, 2021.

GEVARI, M. T.; ABBASIASL, T.; NIAZI, S.; GHORBANI, M.; KOŞAR, A. Direct and indirect thermal applications of hydrodynamic and acoustic cavitation: A review. **Applied Thermal Engineering**, Elsevier, v. 171, p. 115065, 2020.

GRIESER, F.; CHOI, P.-K.; ENOMOTO, N.; HARADA, H.; OKITSU, K.; YASUI, K. **Sonochemistry and the acoustic bubble**. [S.l.]: Elsevier, 2015.

IIDA, P. H.; SCHEER, A. d. P.; WEINSCHUTZ, R.; SANTOS, B. M. d. Estudo do efeito da água em emulsões de petróleo. In: **IV Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás. Campinas, SP**. [S.l.: s.n.], 2007.

KHAVARI, M.; PRIYADARSHI, A.; HURRELL, A.; PERICLEOUS, K.; ESKIN, D.; TZANAKIS, I. Characterization of shock waves in power ultrasound. **Journal of Fluid Mechanics**, Cambridge University Press, v. 915, p. R3, 2021.

LEVARIO-DIAZ, V.; BHASKAR, P.; GALAN, M. C.; BARNES, A. C. Effect of acoustic standing waves on cellular viability and metabolic activity. **Scientific Reports**, Nature Publishing Group UK London, v. 10, n. 1, p. 8493, 2020.

LI, M.; ZHU, Y.; YANG, C.; YANG, M.; RAN, H.; ZHU, Y.; ZHANG, W. Acoustic triggered nanobomb for us imaging guided sonodynamic therapy and activating antitumor immunity. **Drug Delivery**, Taylor & Francis, v. 29, n. 1, p. 2177–2189, 2022.

LI, X.; LI, X.; CUI, W.; MA, T.; LU, L.; WANG, Q. Effect of acoustic streaming on heat transfer of porous composite phase change material by using lattice boltzmann simulation. **Journal of Heat Transfer**, American Society of Mechanical Engineers, v. 143, n. 9, p. 092701, 2021.

LUPORINI, S. Transferência de massa. **Universidade Federal da Bahia, Edição**, 2005.

MARTINES, M. A. U.; DAVOLOS, M. R.; JÚNIOR, M. J. O efeito do ultra-som em reações químicas. **Química Nova**, SciELO Brasil, v. 23, p. 251–256, 2000.

MOGHADDAM, Z. H.; MOKHTARI-DIZAJI, M.; MOVAHEDIN, M. Effect of acoustic cavitation on mouse spermatogonial stem cells: Colonization and viability. **Journal of Ultrasound in Medicine**, Wiley Online Library, v. 40, n. 5, p. 999–1010, 2021.

NEPPIRAS, E. Acoustic cavitation series: part one: Acoustic cavitation: an introduction. **Ultrasonics**, Elsevier, v. 22, n. 1, p. 25–28, 1984.

NISHIGUCHI; HASHIMOTO; YAMAMOTO. Inactivation of bacteria and fungus by ultrasonic cavitation. **Japanese Journal of Multiphase Flow**, J=Stage, v. 35, n. 1, p. 11–18, 2021.

NUSSENVEIG. **Curso de Física Básica 2: Fluidos, Oscilações, Ondas e Calor**. 5. ed. São Paulo: Blucher, 2014.

OLIVEIRA, A. P. H. de; OMURA, M. H.; BARBOSA, É. d. A. A.; BRESSAN, G. C.; VIEIRA, É. N. R.; COIMBRA, J. S. dos R.; OLIVEIRA, E. B. de. Combined adjustment of ph and ultrasound treatments modify techno-functionalities of pea protein concentrates. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, Elsevier, v. 603, p. 125156, 2020.

PANG, X.; SARVOTHAMAN, V. P.; SKILLEN, N.; WANG, Z.; ROONEY, D. W.; RANADE, V. V.; ROBERTSON, P. K. Kinetic modelling of the photocatalytic degradation of diisobutyl phthalate and coupling with acoustic cavitation. **Chemical Engineering Journal**, Elsevier, v. 444, p. 136494, 2022.

PARK, D.; JUNG, H. C.; PARK, J.; BAE, S.; SHIN, U.; KIM, S. W.; KIM, C. W.; LEE, Y. H.; SEO, J. Synthesis of echogenic liposomes for sonoporation. **Micro & Nano Letters**, Wiley Online Library, v. 17, n. 11, p. 276–285, 2022.

PERALTA, G. H.; BÜRGI, M. D. M.; MARTÍNEZ, L. J.; ALBARRACÍN, V. H.; WOLF, I. V.; PEREZ, A. A.; SANTIAGO, L. G.; HYNES, E. R.; BERGAMINI, C. V. Influence of three ultrasound treatments on viability, culturability, cell architecture, enzymatic activity and metabolic potential of lacticaseibacillus paracasei 90. **International Dairy Journal**, Elsevier, v. 131, p. 105371, 2022.

PETKOVŠEK, M.; KRŽAN, A.; ŠMID, A.; ŽAGAR, E.; ZUPANC, M. Degradation of water soluble poly (vinyl alcohol) with acoustic and hydrodynamic cavitation: laying foundations for microplastics. **npj Clean Water**, Nature Publishing Group UK London, v. 6, n. 1, p. 35, 2023.

RANDAD, A.; GHANEM, M. A.; BAILEY, M. R.; MAXWELL, A. D. Design, fabrication, and characterization of broad beam transducers for fragmenting large renal calculi with burst wave lithotripsy. **The Journal of the Acoustical Society of America**, AIP Publishing, v. 148, n. 1, p. 44–50, 2020.

RISCH, S. J. Encapsulation: overview of uses and techniques. ACS Publications, 1995.

ROBIONY, M.; POLINI, F.; COSTA, F.; VERCELLOTTI, T.; POLITI, M. Piezoelectric bone cutting in multipiece maxillary osteotomies. **Journal of Oral and Maxillofacial Surgery**, Elsevier, v. 62, n. 6, p. 759–761, 2004.

RONCHI, R. P. **Avaliação da eficiência do ultrassom no processo de separação de fases em água produzida e em emulsões sintéticas do tipo O/A**. Tese (Doutorado) — Dissertação de Mestrado. Departamento de Energia, Universidade Federal do ... , 2014.

SAHOO, B. N.; HAN, S. Y.; KIM, H.-T.; ANDO, K.; KIM, T.-G.; KANG, B.-K.; KLIPP, A.; YERRIBOINA, N. P.; ZHANG, J.-G. Chemically controlled megasonic cleaning of patterned structures using solutions with dissolved gas and surfactant. **Ultrasonics Sonochemistry**, Elsevier, v. 82, p. 105859, 2022.

SILVA, M.; KADAM, M. R.; MUNASINGHE, D.; SHANMUGAM, A.; CHANDRAPALA, J. Encapsulation of nutraceuticals in yoghurt and beverage products using the ultrasound and high-pressure processing technologies. **Foods**, MDPI, v. 11, n. 19, p. 2999, 2022.

SVIRIDOV, A.; MAZINA, S.; OSTAPENKO, A.; NIKOLAEV, A.; TIMOSHENKO, V. Antibacterial effect of acoustic cavitation promoted by mesoporous silicon nanoparticles. **International Journal of Molecular Sciences**, MDPI, v. 24, n. 2, p. 1065, 2023.

- TANG, N.; TANG, J.; TANG, J.; ZHU, Q.; DONG, X.; ZHANG, Y.; LI, N.; LIU, Z. Sononeoperfusion: a new therapeutic effect to enhance tumour blood perfusion using diagnostic ultrasound and microbubbles. **Cancer Imaging**, Springer, v. 23, n. 1, p. 29, 2023.
- TIAN, Y.; LUO, W.; WANG, Y.; YU, Y.; HUANG, W.; TANG, H.; ZHENG, Y.; LIU, Z. Ultrasound-assisted fast encapsulation of metal microparticles in sio₂ via an interface-confined sol-gel method. **Ultrasonics Sonochemistry**, Elsevier, v. 73, p. 105484, 2021.
- WU, J. Acoustic streaming and its applications. **Fluids**, MD, v. 3, n. 4, p. 108, 2018.
- XIE, H.; LI, W.; LIU, H.; CHEN, Y.; MA, M.; WANG, Y.; LUO, Y.; SONG, D.; HOU, Q.; LU, W. et al. Erythrocyte membrane-coated invisible acoustic-sensitive nanoparticle for inducing tumor thrombotic infarction by precisely damaging tumor vascular endothelium. **Small**, Wiley Online Library, v. 18, n. 30, p. 2201933, 2022.
- YASUI, K. **Acoustic cavitation**. [S.l.]: Springer, 2018.
- YOUNG, F. **Fisica 2: Ondas e Termodinâmica**. 14. ed. São Paulo: Pearson, 2016.
- YUSOF, N. S. M.; BABGI, B.; ALGHAMDI, Y.; AKSU, M.; MADHAVAN, J.; ASHOKKUMAR, M. Physical and chemical effects of acoustic cavitation in selected ultrasonic cleaning applications. **Ultrasonics sonochemistry**, Elsevier, v. 29, p. 568–576, 2016.
- ZHANG, H.; WANG, B.; GAO, C.; ZHU, T.; XIONG, M.; REN, H. Effective degradation of hydrolyzed polyacryamide (hpam) in a simultaneous combination of acoustic cavitation and microbubbles ozonation: Process optimization and degradation mechanism. **Process Safety and Environmental Protection**, Elsevier, v. 159, p. 465–476, 2022.
- ZHANG, Z.; WANG, K.; XU, C.; ZHANG, Y.; WU, W.; LU, C.; LIU, W.; RAO, Y.; JIANG, C.; XU, C. et al. Ultrasound enhancing the mass transfer of droplet microreactor for the synthesis of agins₂ nanocrystals. **Chemical Engineering Journal**, Elsevier, v. 435, p. 134948, 2022.