

Estudo e Monitoramento Tecnológico da Utilização do Ultrassom em Processos Químicos e com Membranas

Study and Technological Monitoring of Ultrasound Use in Chemical and Membrane Processes

Thiago Rodrigo Barbosa Barros¹

Valdirio Alexandre Gadelha Segundo¹

Caio Cefas da Nobrega Souza¹

José Nilton Silva¹

¹Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, Brasil

Resumo

Este artigo refere-se ao estudo de monitoramento da geração tecnológica no desenvolvimento de processo utilizando ultrassom, a partir da pesquisa de informações nos principais bancos de patentes, como Escritório Europeu de Patentes (EPO), Escritório Americano de Marcas e Patentes (USPTO), o Instituto Nacional de Propriedade Industrial (INPI) do Brasil, entre outros. Para levantamento das informações foi utilizada a plataforma Questel Orbit®, aplicando como entrada as palavras-chaves para as buscas “sonoquímica”, “ultrassom”, “membranas”, “polimérica”. Foram executadas análises “macro”, “meso” e “micro”, com o objetivo de levantar as principais características tecnológicas relacionadas ao processo utilizando ultrassom ao longo dos últimos anos. Dentre as áreas de tecnologias relacionadas ao Ultrassom, a que mais se destacou foi Engenharia Química na preparação e utilização do ultrassom em membranas poliméricas, somando 19% do total. A principal matéria-prima utilizada para a produção/aplicação juntamente com o ultrassom foi o polímero polieterimida, com destaque também para celulose.

Palavras-chave: Monitoramento tecnológico. Patente. Ultrassom. Membranas poliméricas.

Abstract

This article refers to the study of monitoring of technological generation in the development of process using sleep chemistry, from the research of information in the main patent banks, such as the European Patent Office (EPO), the US Patent and Trademark Office (USPTO), the Brazilian National Institute of Industrial Property (INPI), among others. To obtain the information, the Questel Orbit® platform was used, applying as input the keywords for the searches “sonochemical”, “ultrasound”, “membranes”, “polymer”. We performed “macro”, “meso” and “micro” analyzes, with the objective of raising the main technological characteristics related to the process using sleep ultrasound over the last years. Among the areas of ultrasound-related technologies, Chemical Engineering was the most prominent in the preparation and use of ultrasound in polymer membranes, accounting for 19% of the total. The main raw material used for the production / application together with the ultrasound was the polymer polyetherimide, also prominent for cellulose.

Keywords: Technological monitoring. Patent. Ultrasound. Polymer membranes.

Area Tecnológica: Processos Químicos.



1 Introdução

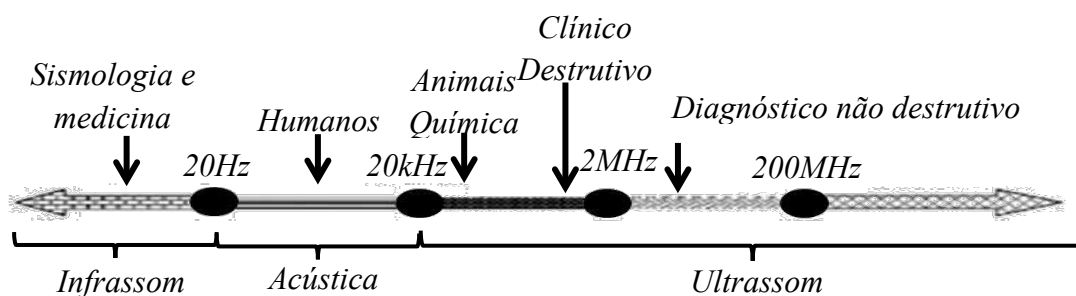
A sonoquímica é o ramo da química que estuda os efeitos das ondas ultrassônicas em processos químicos. Pode gerar altas tensões de cisalhamento e forças hidrodinâmicas que tem a capacidade de modificar estruturas químicas proveniente das bolhas geradas pelo ultrassom (CHITARRA, 2013).

No ramo da Engenharia Química, o ultrassom vem sendo cada vez mais explorado. Dois tipos de sistemas sonoquímicos são identificados: a fonte de ultrassom concentrada, conhecida como imersão de sondas ultrassônicas, em que a energia acústica total é dispersa pela ponta da sonda do transdutor, aumentando a eficiência da mistura (GOGATE; SUTKAR; PANDIT, 2011). O outro sistema é o de fonte de ultrassom distribuída (banho ultrassônico), que é mais popular, devido ao baixo custo, porém apresenta baixa intensidade de cavitação no meio reacional (GOODWIN, 1990).

Os processos envolvendo sonoquímicos nos últimos anos atraiu o interesse da indústria química. Isso ocorre porque esses processos que usam ultrassom utilizam energia ultrassônica que oferece a possibilidade real de uma tecnologia capaz de auxiliar no aumento da mobilidade molecular e, de um modo geral, acaba aumentando a transferência de massa, tornando as reações mais eficientes, acelerando-as e proporcionando um maior rendimento reacional da mistura (PRINCE, 1992; KODA; YASUDA, 2015; VINATORU; MASON, 2017).

As ondas ultrassônicas são ondas sonoras de frequências acima de 20 kHz. Podem ser classificadas em quatro categorias diferentes com base no modo de vibração da partícula no meio, com relação à direção da propagação das ondas iniciais (RAJ; RAJENDRAN; PALANICHAMY, 2004), podendo ser: ondas longitudinais/compressão, ondas transversais/cisalhamento, ondas de superfície e placas. Como pode ser observado na Figura 1, dependendo da frequência, o ultrassom é dividido em três categorias, a saber: ultrassom de potência (20-100 kHz), ultrassom de alta frequência (100 kHz-1 MHz), e ultrassom diagnóstico (1-500 MHz). O ultrassom que varia de 20 a 100 kHz é usado em sistemas quimicamente importantes, em que as mudanças químicas e físicas são desejadas, uma vez que tem a capacidade de provocar a cavitação das bolhas (PILLI *et al.* 2011; RASTOGI, 2011). A faixa do ultrassom que varia entre 1 e 10 MHz é utilizada para comunicação, detecção de fissuras ou falhas nos sólidos, e navegação aquática baseado no eco localização bem como para fins de diagnóstico (PILLI *et al.* 2011).

Figura 1 – Diagrama de faixa do ultrassom

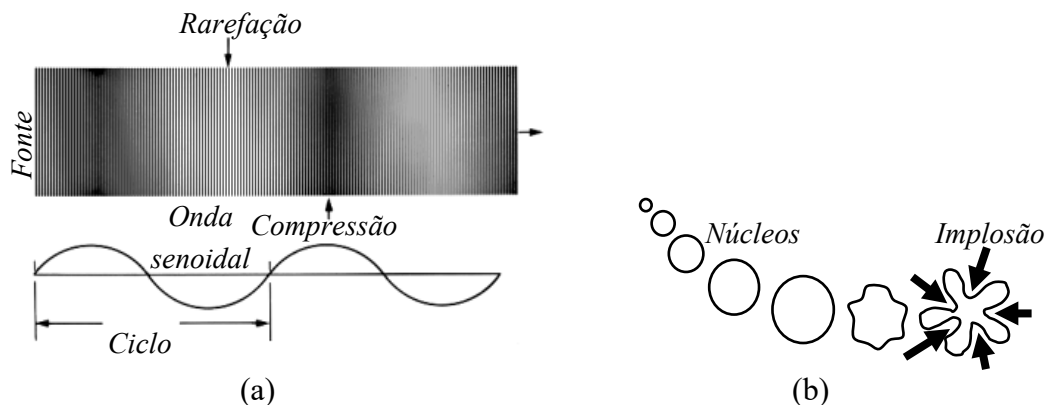


Fonte: Adaptado de Pilli *et al.* (2011)

Em equipamentos, as ondas ultrassônicas são provocadas por transdutores construídos a partir de materiais piezelétricos, em que o transdutor além de emitir o sinal ultrassônico também tem a funcionalidade de detector ao receber os ecos refletidos na interface de um meio reacional (BISCEGLI, 2003). O método de preparação sonoquímica utiliza o fenômeno de cavitação acústica que inclui a formação das bolhas e seu crescimento sucessivo provoca colapso implosivo em uma mistura dos íons e aglomerados dos reagentes (MOGHTADA; ASHIRI, 2015). Em um processo principalmente adiabático, esse colapso das bolhas crescentes leva a um enorme acúmulo de energia resultante de altas pressões e temperaturas em regiões microscópicas localizadas dentro da mistura de solução sonicada (ASHIRI; MOGHTADA; SHAHROUZIANFAR, 2015).

Quando aplicado em fluidos líquidos, as ondas de ultrassom consistem em uma sucessão cíclica de expansão (rarefação) e as fases de compressão transmitida por vibrações mecânicas (TANG, 2003), como mostra a Figura 2.a. Ciclos de compressão exercem uma pressão positiva e empurra as moléculas agrupadas do líquido, enquanto os ciclos de expansão exercem uma pressão negativa, puxando as moléculas (VAJNHANDL; MARECHAL, 2005). Quando a amplitude de pressão excede a resistência à ruptura do líquido nas regiões rarefação, espaços vazios chamados de bolhas de cavitação, que são pequenas bolhas de cheias de vapor, são formados seguidas por violenta implosão (CHEN, 2012), como mostra a Figura 2.b.

Figura 2 – Efeitos em um líquido provocado por ondas ultrassom (a) rarefação e compressão; (b) cavitação



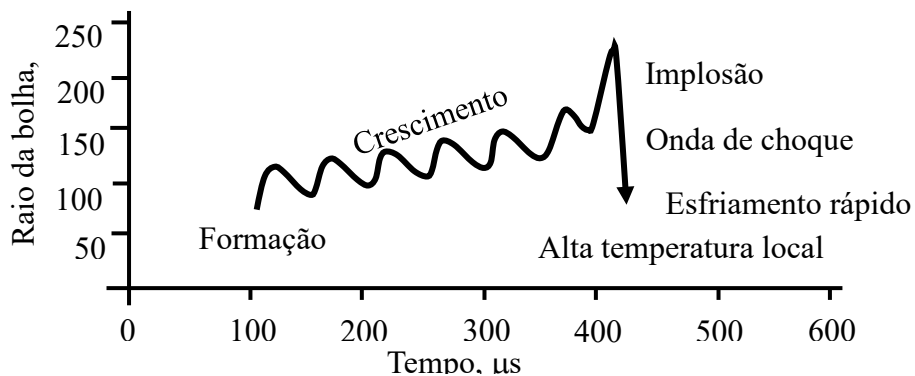
Fonte: Vajnhandl e Marechal (2005)

Geralmente, líquidos puros possuem grandes resistências à ruptura e, assim, os geradores de ultrassom disponíveis são incapazes de produzir pressões negativas altas o suficiente para causar a cavitação. No entanto, a maior parte dos líquidos é normalmente impura e a sua resistência à ruptura é reduzida devido à presença de numerosas pequenas partículas, sólidos dissolvidos pré-existentes, e outros contaminantes. As impurezas no líquido representam pontos fracos em um líquido onde a nucleação de bolhas de cavitação ocorrerá (VAJNHANDL; MARECHAL, 2005). Por exemplo, quando a água pura é usada, mais do que 1000 atm de pressão negativa seria necessária para a cavitação que, para a água da torneira, apenas alguns atmosfera de pressão que seja suficiente para formar bolhas (CHOWDHURY; VIRARAGHAVAN, 2009).

Uma vez que uma bolha é criada, dois fenômenos de cavitação podem ocorrer no líquido, sendo: cavitação estável e/ou cavitação transitória. Na cavitação estável, as paredes das bolhas oscilam com o campo ultrassônico em um raio de equilíbrio para vários ciclos. Isto ocorre a ondas de baixas intensidades, sendo o tamanho da bolha oscilando em fase de expansão e com ciclos de compressão, e crescem lentamente ao longo de muitos ciclos (THANGAVADIVEL *et al.* 2012). Devido à pequena variação nas mudanças de tamanho da bolha, esse processo é de pouca importância em termos de efeitos químicos (DESTAILLATS; HOFFMANN; WALLACE, 2003). O processo é também chamado de difusão retificada, como durante a expansão vapor de água de gases dissolvidos e/ou vapor orgânico entram na bolha e saem durante a contração por causa do efeito da área de superfície da bolha (THANGAVADIVEL *et al.*, 2012).

Quando o campo ultrassônico de alta intensidade é introduzido, ocorre geralmente a cavitação transitória. Isso faz o tamanho da bolha de cavitação aumente drasticamente a partir de dezenas a centenas de vezes o raio de equilíbrio antes de entrar em colapso violentamente em menos de um microssegundo (DESTAILLATS; HOFFMANN; WALLACE, 2003; VAJNHANDL; MARECHAL, 2005). No entanto, a classificação de cavitação é vaga, pois a cavitação estável pode levar a cavitação transitória ou cavitação transitória pode produzir bolhas muito pequenas que sofrem cavitação estável (VAJNHANDL; MARECHAL, 2005). Em resumo, o fenômeno de cavitação consiste na repetição de três fases distintas: a formação (nucleação), de crescimento rápido (expansão) durante os ciclos, até atingir um tamanho crítico, e colapso violento no líquido, como mostrado na Figura 3.

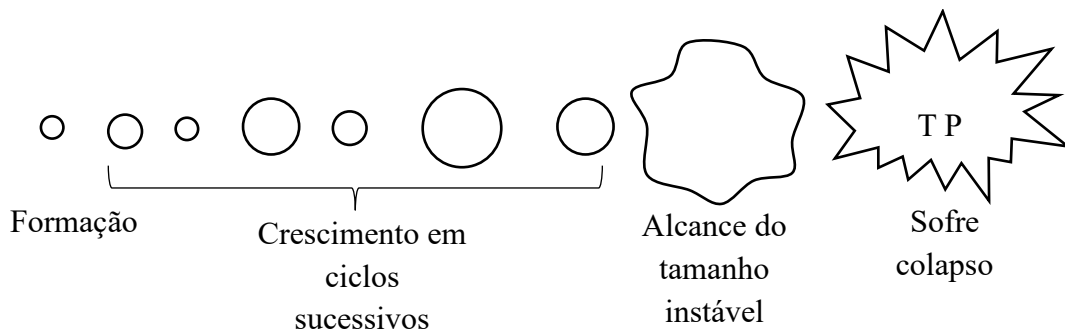
Figura 3 – Crescimento e implosão de bolhas de cavitação em solução aquosa sob irradiação ultrassônica



Fonte: Pang *et al.* (2011)

A energia sonora difusa é concentrada a partir da cavitação produzida por meio do campo ultrassonor de baixa ou alta intensidade, uma vez que a bolha de cavitação passe por um crescimento rápido e não consiga mais absorver energia de forma eficiente, aumentando a velocidade de escoamento do líquido (SUSLICK, 1989; SUSLICK, 1990). No momento do colapso, cada bolha atua como um ponto de acesso, a geração de energia para aumentar a temperatura e pressão até 5000 K e 500 atm, respectivamente, e a velocidade de arrefecimento tão rápido quanto 1×10^9 K / s., como mostra na Figura 4.

Figura 4 – Formação de bolhas de cavitação, crescimento e colapso



Fonte: Suslick (1990)

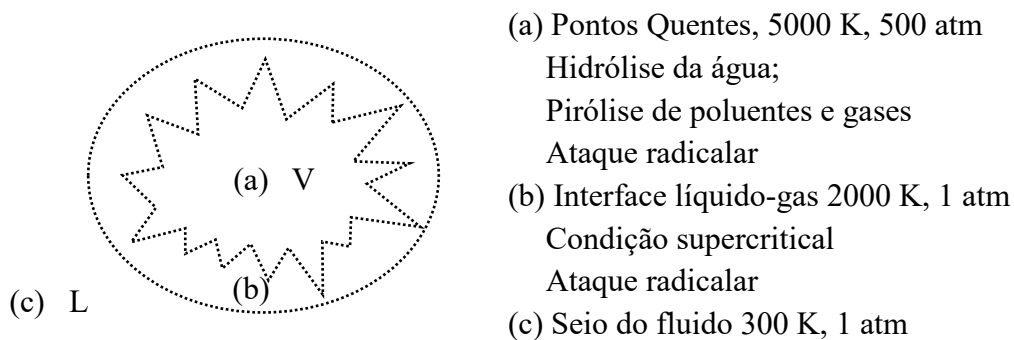
Vários parâmetros afetam o processo de cavitação e colapso da bolha, como: frequência e intensidade da onda, característica e propriedades físico-química do fluido, temperatura e pressão externa.

A alta frequência reduz o efeito cavitacional devido à pressão negativa produzida pelo ciclo de rarefação ter duração insuficiente e/ou intensidade de início da cavitação, assim também, o ciclo de compressão ocorre mais rapidamente do que o tempo para microbolhas em colapso (ADEWUYI, 2001). Na menor frequência, a cavitação mais intensa será produzida, resultando em temperaturas e pressão localizadas mais altas (VAJNHANDL; MARECHAL, 2005). O aumento da intensidade do sinal ultrassônico irá aumentar a amplitude do sinal, resultando em uma cavitação com colapso da bolha mais violento (ADEWUYI, 2001).

As cavitações são mais facilmente formadas em solvente com alta pressão de vapor, baixa viscosidade e baixa tensão superficial (ADEWUYI, 2001). No entanto, quanto maior for a pressão de vapor, menos violento será o colapso de bolhas devido à maior quantidade de vapor que entre as bolhas (PETERS, 1996).

A presença de gases solúveis irá resultar na formação de um maior número de núcleos de cavitação. No entanto, a maior solubilidade do gás causaria mais moléculas de gás para difundir em bolha cavitacional, provocando seu colapso a ser menos violento (VAJNHANDL; MARECHAL, 2005). Proporção de calor capacidade (C_p/C_v) ou relação politrópica e condutividade térmica do gás também afetará a quantidade de liberação de calor durante o colapso (PETERS, 1996; ADEWUYI, 2001).

Há quatro teorias para explicar os efeitos sonoquímicos: Teoria de pontos quentes (*hot-spot*); teoria elétrica; teoria descarga de plasma, e a teoria supercrítico. Essas teorias levam a vários modos de reatividade: decomposição pirolítica, oxidação do radical OH^* , química do plasma, e oxidação da água supercrítica. Dentre essas teorias, a teoria de pontos quentes é amplamente aceita para explicar as reações sonoquímica na área ambiental (ADEWUYI, 2001). De acordo com a teoria de pontos quentes, cada microbolha age como um microreator que produz diferentes espécies reativas e calor durante o seu colapso (VAJNHANDL; MARECHAL, 2005). O perfil de temperatura mostra que existem três zonas associadas com uma bolha de cavitação (CHEN, 2012), conforme ilustrado na Figura 5.

Figura 5 – Zona de reação do processo de cavitação

Fonte: Chowdhury e Viraraghavan (2009)

De acordo com Koda e Yasuda (2015) transdutores ultrassônicos de diferentes escalas são utilizados em diferentes processos, como: sólido-líquido (limpeza, extração, separação, agregação e dispersão) no qual são utilizados ultrassom de frequências abaixo de 100 kHz; já nos processos líquido-líquido (emulsificação), gás-líquido (atomização) e reação (polimerização), são utilizadas frequências maiores que 100 kHz.

A incrustação de membranas é o desafio mais grave nos processos de microfiltração (MF) e ultrafiltração (UF), como uma possível solução para esse problema a técnica de ultrassom tem sido utilizada (KYLONEN; PIRKONEN; NYSTROM, 2005). A melhoria significativa do fluxo de permeado na UF inoperante da solução foram atribuídos principalmente às características do processo ultrassônico, como cavitação, transmissão acústica, transmissão micro, etc (LAMMINEN; WALKER, 2004).

O estudo de monitoramento tecnológico faz parte do estudo de prospecção tecnológica, ou *forecast (ing)*, *foresight (ing)* ou *future studies*, que permite fornecer informações e indicações das principais tendências tecnológicas no contexto mundial (PORTER, 2004). Esses estudos auxiliam a identificação do estado da técnica de tecnologias e suas tendências e desenvolvimento tecnológicos, alinhado com as necessidades da sociedade. A sistematização da prática de monitoramento tecnológico consiste em coletar, analisar informações sobre os desenvolvimentos científicos e tecnológicos em uma dada área de interesse, para dar suporte em uma ação ou decisão.

A busca em documentos de patentes permite gerar informações de apoio ao levantamento do estado da técnica da tecnologia ultrassônica em processos químicos. A partir do estado da técnica e do estado da arte disponível, tem-se a possibilidade de identificar os estágios e relevância das tecnologias, tendência para surgimento de novas tecnologias, investimentos, processos, produtos, PD&I, fusões e aquisições, parceiros, concorrentes no mercado, entre outras.

Diante o exposto, o objetivo deste estudo foi realizar o levantamento do estado da técnica atual do ultrassom em processos a partir da aplicação sistemática do monitoramento de patentes para verificação do desenvolvimento tecnológico utilizando a plataforma Questel Orbit®.

2 Metodologia

Neste estudo o método de monitoramento tecnológico realizado utiliza informações oriundas dos documentos de patentes, utilizando como principal ferramenta de busca a plataforma Questel Orbit®, que consiste em pesquisar informações nos principais bancos de patentes, como Escritório Europeu de Patentes (EPO), Escritório Americano de Marcas e Patentes (USPTO), o Instituto Nacional de Propriedade Industrial (INPI) do Brasil, entre outros.

A metodologia de pesquisa, empregada com o objetivo de mapear patentes no contexto do ultrassom em processos, consistiu em busca empregando palavras-chave e/ou classificação internacional de patentes (International Patent Classification – IPC) como entrada para a ferramenta Questel Orbit®. Inicialmente, buscou-se como palavras-chave “sonoquímica”, “ultrassom”, “membrana”, “polymer” nos campos título, resumo e palavras-chave, de forma a obter o maior número possível de documentos de 1998 a junho de 2018. Depois da análise de 200 documentos considerados como relevantes para o estudo, foram analisados com mais detalhe no total 62 patentes concedidas. A leitura dos documentos de patentes selecionadas foi realizada com o intuito de extração de informações em três níveis diferentes, a saber: Macro, Meso e Micro.

Análise no nível Macro consistiu em uma análise dos documentos de acordo com a série histórica de depósitos/publicações, a distribuição por países, por universidades, centros de pesquisa e empresas ligadas ao conhecimento científico e desenvolvimento da tecnologia, parcerias (internacionais e com empresas).

Na análise do nível Meso os documentos foram categorizados de acordo com os aspectos mais relevantes nas áreas tecnológicas em torno dos processos químicos utilizando ultrassom em membranas poliméricas. Cabe ressaltar que o mesmo documento pode estar incluído em mais de uma área.

Por fim, como análise do nível Micro, foram identificadas as particularidades e detalhes de cada documento de acordo com os aspectos mais relevantes do tema abordado, considerando a seguinte taxonomia.

- a) Processos e tecnologia: quando são identificados nos documentos etapas e tecnologias do tema relacionado.
- b) Matéria-prima: quando são identificadas nos documentos as principais matérias-primas para realização do processo.
- c) Equipamento: são identificados os equipamentos utilizados de acordo com cada processo.
- d) Análise de caracterização: são observadas as técnicas de caracterização do método, visando à caracterização do produto, avaliação de rendimentos e custos econômicos.

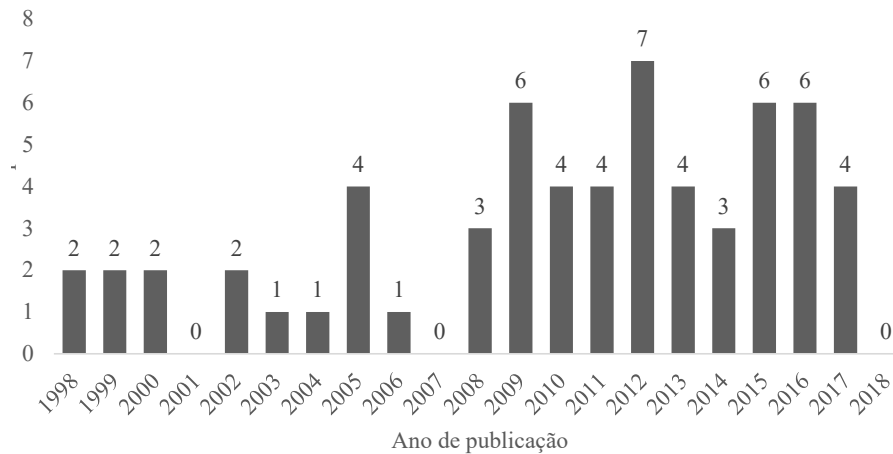
3 Resultados e Discussão

Depois da realização das buscas e leitura do conteúdo dos documentos de patentes selecionados a partir da metodologia aplicada, as informações extraídas foram analisadas nos três níveis de análise.

3.1 Distribuição de Patentes

A primeira análise está relacionada à evolução da produção tecnológica em número de patentes por ano. É possível observar na Figura 6 que nos anos 1998 e 2018 houve uma quantidade significativa de documentos no interesse em torno dos processos químicos envolvendo ultrassom.

Figura 6 – Distribuição das patentes por ano de publicação

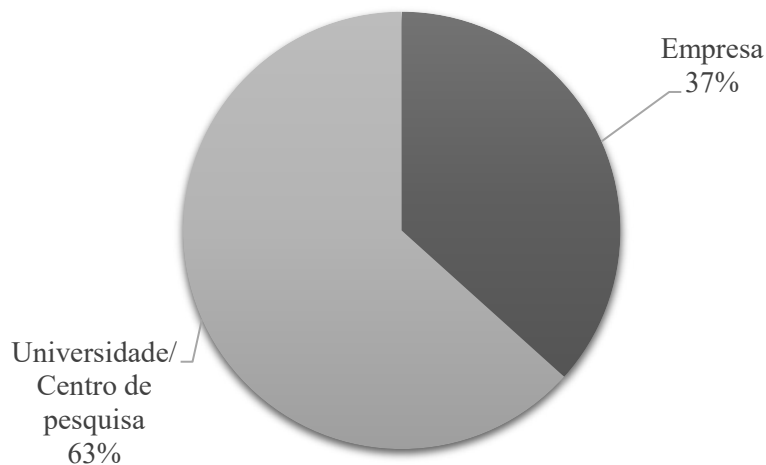


Fonte: Questel Orbit® (2018)

De acordo com a Figura 6, houve uma crescente busca referente ao tema abordado de 2009 a 2016, tendo como maior número de publicações o ano de 2012, com sete patentes.

As instituições que desenvolvem tecnologias relacionadas ao tema foram classificadas em universidades/centros de pesquisas e empresas. Dentre essas, se destacam as universidades/centros de pesquisas. Essa distribuição está representada na Figura 7.

Figura 7 – Distribuição das patentes por tipos de instituição



Fonte: Questel Orbit® (2018)

Nas Tabelas 1 e 2 a seguir estão descritas as principais universidades/centros de pesquisa e empresas que estão relacionados com o ultrassom em processos, respectivamente com no

mínimo 1 patente publicada e concedida. O número total de universidades/centros de pesquisas foi de 19, já o de empresas foi de 11.

Tabela 1 – Principais centros de pesquisa

PRINCIPAIS CENTROS DE PESQUISA	NÚMERO DE PUBLICAÇÕES	PAÍSES
Institute of chemistry, chinese academy of science	2	China
Mit massachusetts institute of technology	2	Estados Unidos
Zhejiang gongshang university	2	China
Admiral gi nevelskoy maritime university	1	Rússia

Fonte: Questel Orbit® (2018)

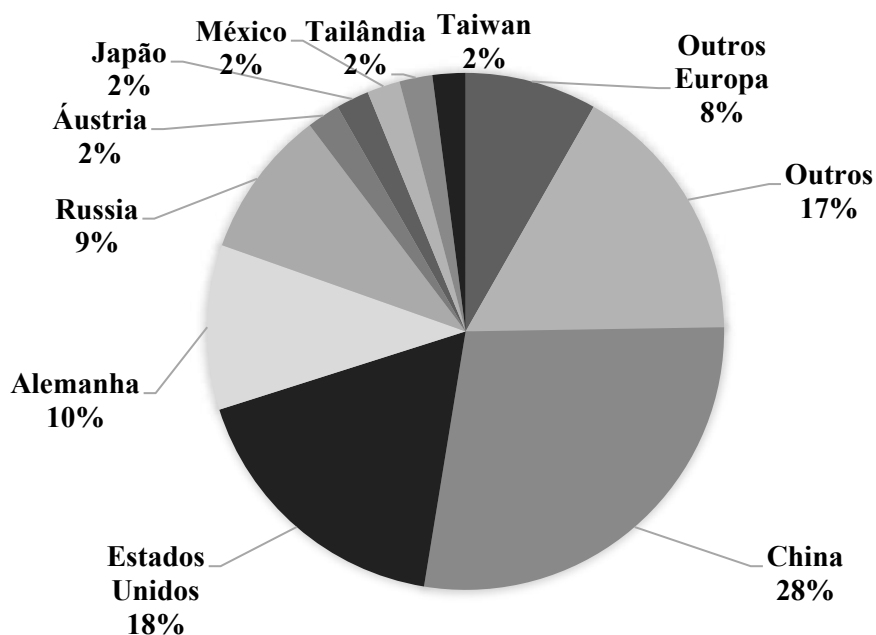
Tabela 2 – Principais empresas

PRINCIPAIS EMPRESAS	NÚMERO DE PUBLICAÇÕES	PAÍSES
Daimler	2	Alemanha
Philips	2	Holanda
Robert Bosch	2	Alemanha
W L Gore & Associates	2	Estados Unidos
Acusphere	1	Estados Unidos

Fonte: Questel Orbit® (2018)

Em relação à origem dos países das patentes depositantes, a China se destaca, com 28% do total de número de patentes depositadas, devido ao grande número de processos utilizando o ultrassom. Na Figura 8, percebe-se uma concentração maior do desenvolvimento da utilização do ultrassom em processos químicos em membranas nos países desenvolvidos/emergentes.

Figura 8 – Distribuição das patentes por países depositantes



Fonte: Questel Orbit® (2018)

A Tabela 3 a seguir mostra os percentuais de patentes publicadas por países, na qual a China apresenta o maior percentual de 25,23% de publicações relacionadas ao tema abordado, já os menores percentuais que foram de 1,87% encontram-se entre Taiwan, Holanda, Itália, Irlanda, França, Canadá, Bélgica e Áustria.

Tabela 3 – Distribuição de patentes publicadas por países

PAÍSES	PATENTES PUBLICADAS
Taiwan, Holanda, Itália, Irlanda, França, Canadá, Bélgica e Áustria	1,87
República da Coreia, Reino Unido, Espanha e Outros	2,8
México e Índia	3,74
Rússia e Alemanha	4,67
Japão	5,61
Outros Europa	7,48
Estados Unidos	9,35
China	25,23

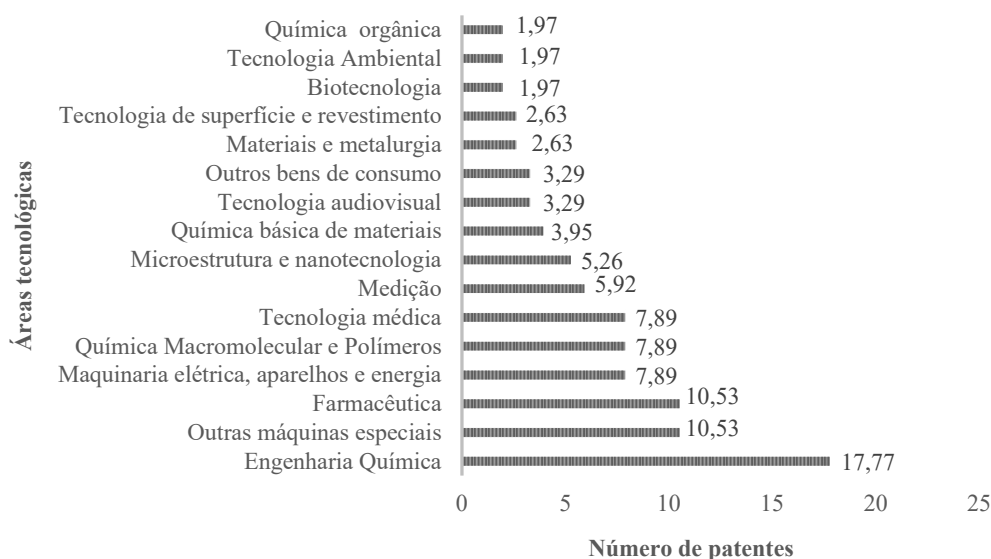
Nota: *Cada país.

Fonte: Questel Orbit® (2018)

3.23.2 Características Tecnológicas

Foram identificadas 16 áreas diferentes de tecnologias relacionadas com a utilização do ultrassom em processos químicos em membranas. Na Figura 9, mostra-se a distribuição do número de patentes por áreas tecnológicas. Sobre os tipos de áreas, pode-se destacar a de Engenharia Química, que apresentou o maior percentual de patentes relacionadas ao tema. Outras áreas com relevância aos processos químicos envolvendo o ultrassom também foram mencionadas, como: Química Básica de Materiais, Química Macromolecular e Polímeros.

Figura 9 – Distribuição de patentes nas áreas tecnológicas



Fonte: Questel Orbit® (2018)

Para a realização da etapa de análise micro foram analisados 62 documentos de patentes, porém apenas 25 tornaram-se relevantes para obter informações referentes ao tema pesquisado.

3.3 Distribuição por Aplicações

Dentre as 25 patentes analisadas, as principais aplicações de processos utilizando o ultrassom em membranas são:

a) Na fabricação de membranas:

- Polimérica para difusão = 4 patentes
- Microcápsulas de matrizes poliméricas = 3 patentes
- Fibra oca = 3 patentes
- Nano-fibra de condução = 2 patentes

b) Nos processos com membranas:

- Polimerização de polímeros = 1 patente
- Filtração de metais = 3 patentes
- Troca catiônica e aniônica de íons, transferência de íons melhorando o fluxo de permeado = 9 patentes

Das informações levantadas a respeito das aplicações, pode-se destacar as áreas de fabricação e processo por membranas. Sendo a principal função do ultrassom a de mistura e limpeza de superfícies.

4 Considerações Finais

A partir do estudo das patentes publicadas de 1998 a 2018, pode-se obter o seguinte:

- a) Analisando os depósitos por ano, pode-se verificar que houve aumento gradual do número de tecnologias criadas relacionadas com a utilização de ultrassom em processos químicos, e o ano 2012 apresentou o maior número de depósitos de patentes.
- b) Em relação aos países, observa-se que China e Estados Unidos aparecem em destaque no depósito de patentes. As universidades e centros de pesquisas tiveram o maior número de depósitos.
- c) Entre as áreas de tecnologias relacionadas ao ultrassom, a que mais se destacou foi Engenharia Química na preparação e utilização do ultrassom em membranas poliméricas, somando 19% do total.
- d) A principal matéria-prima utilizada para a produção/aplicação foi o polímero polieterimida, com destaque também para celulose.
- e) Em relação ao processo ultrassônico, destaca-se a filtração de metais e a transferência de íons através de membranas poliméricas.

Referências

- ADEWUYI, Y. G. Sonochemistry: environmental science and engineering applications. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, [S.l.], v. 40, p. 4681–4715, 2001.
- ASHIRI, R.; MOGHTADA, A.; SHAHROUZIANFAR, A. Processing and characterization of carbonate-free BaTiO₃ nanoscale particles obtained by a rapid ultrasound-assisted wet chemical approach. **Metallurgical and Materials Transactions B**, [S.l.], v. 46, p. 1912–1923, 2015.
- BISCEGLI, C. I. **Conceitos da Física do Ultra-som**. São Carlos: Embrapa, 2003.
- CHEN, D. Applications of ultrasound in water and wastewater treatment. In: CHEN D, SHARMA, S. K, MUDHOO, A (Ed.). **Handbook on application of ultrasound: sonochemistry for sustainability**. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2012.
- CHITARRA, G. S. **Aplicação do método da sonoquímica na avaliação da degradabilidade de polímero**. 2013. 34 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Química) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2013.
- CHOWDHURY, P.; VIRARAGHAVAN, T. Sonochemical degradation of chlorinated organic compounds, phenolic compounds and organic dyes-a review. **The Science of the Total Environment**, [S.l.], v. 407, p. 2474–2492, 2009.
- DESTAILLATS, H.; HOFFMANN, M. R.; WALLACE, H. C. Sonochemical degradation of pollutants. In: TARR M. A. (Ed.). **Chemical degradation methods for wastes and pollutants**. Environmental and industrial applications. USA: Marcel Dekker, Inc., 2003.
- GOGATE, P. R.; SUTKAR, V. S.; PANDIT, A. B. Sonochemical reactors: important design and scale up considerations with a special emphasis on heterogeneous systems. **Chemical Engineering Journal**, [S.l.], v. 166, p. 1066–1082, 2011.
- GOODWIN, T. J. Equipment. In: MASON, T. J. **Critical Reports on Applied Chemistry**. Elsevier **Chemistry With Ultrasound**, London, v. 28, p. 159–187, 1990.
- KODA, S.; YASUDA, K. Sonochemical Engineering Processes. **Sonochemistry and the Acoustic Bubble**, [S.l.], v. 1, p. 151–169, 2015.
- KYLLONEN, H. M.; PIRKONEN, P.; NYSTROM, M. Membrane filtration enhanced by ultrasound: a review. **Desalination**, [S.l.], v. 181, p. 319–335, 2005.
- LAMMINEN, M. O.; WALKER H. W. Weavers. Mechanisms and factors influencing the ultrasonic cleaning of particle-fouled ceramic membranes. **Journal of Membrane Science**, [S.l.], v. 237, p. 213–223, 2004.
- MOGHTADA, A; ASHIRI, R. Enhancing the formation of tetragonal phase in perovskite nanocrystals using an ultrasound assisted wet chemical method. **Ultrason Sonochem**, [S.l.], v. 33, p. 141–149, 2016.
- PANG, Y. L.; ABDULLAH, A. Z.; BHATIA, S. Review on sonochemical methods in the presence of catalysts and chemical additives for treatment of organic pollutants in wastewater. **Desalination**, [S.l.], v. 277, n.1-3, p.1–14, 2011.
- PETERS, D. Ultrasound in materials chemistry. **Journal of Materials Chemistry**, [S.l.], v. 6, p. 1605–1618, 1996.

PILLI, S. *et al.* Ultrasonic pretreatment of sludge: a review. **Ultrason Sonochem**, [S.l.], v. 18, p. 1–18, 2011.

PORTER, A. L. Technology futures analysis: towards integration of the field and new methods. **Technological Forecasting and Social Change**, [S.l.], v. 71, p. 287–303, 2004.

PRICE, G. J. Introduction to Sonochemistry. In: PRICE, G. J. **Current Trends in Sonochemistry**. Cambridge: The Royal Society of Chemistry, 1992. p. 1–7.

QUESTEL ORBIT. **Orbit Intelligence**. Disponível em: <<https://www32.orbit.com/>>. Acesso em: jun. 2018.

RAJ, B.; RAJENDRAN, V.; PALANICHAMY, P. Science and technology of ultrasonics. **Pangbourne**, UK, 2004.

RASTOGI, N. K. Opportunities and challenges in application of ultrasound in food processing. **Critical Reviews in Food Sciences**, [S.l.], v. 51, p. 705–722, 2011.

SUSLICK, K. S. Sonochemistry. **Science**, [S.l.], v. 247, p. 1438–1445, 1990.

_____. The chemical effect of ultrasound. **Scientific American**, [S.l.], v. 260, p. 80–86, 1989.

TANG, W. Z. **Physicochemical treatment of hazardous wastes**. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2003.

THANGAVADIVEL, K. *et al.* Degradation of organic pollutants using ultrasound. In: CHEN, D.; SHARMA, S. K.; MUDHOO, A. (Ed.). **Handbook on application of ultrasound: sonochemistry for sustainability**. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2012.

VAJNHANDL, S.; MARECHAL, A. M. L. Ultrasound in textile dyeing and the decolourization/mineralization of textile dyes. **Dyes Pigments**, [S.l.], v. 65, p. 89–101, 2005.

VINATORU, M.; MASON, T. Comments on the use of loop reactors in sonochemical processes. **Ultrasonics Sonochemistry**, [S.l.], v. 39, p. 240–242, 2017.

Sobre os autores

Thiago Rodrigo Barbosa Barros

E-mail: thiagojdbarbosa@gmail.com

Doutorando em Engenharia Química na Universidade Federal de Campina Grande (UFCG); mestre em Engenharia Química, pela UFCG; e graduado em Química Industrial, pela na Universidade Estadual da Paraíba (UEPB).

Endereço profissional: R. Aprígio Veloso, 882 – Universitário, Campina Grande, PB. CEP: 58429-900.

Valdirio Alexandre Gadelha Segundo

E-mail: valdirio.segundo@eq.ufcg.edu.br

Graduando em Engenharia Química, pela Universidade Federal de Campina Grande (UFCG).

Endereço profissional: R. Aprígio Veloso, 882 – Universitário, Campina Grande, PB. CEP: 58429-900.

Caio Cefas da Nobrega Souza

E-mail: caio.cefas@eq.ufcg.edu.br

Doutorando em Engenharia Química na Universidade Federal de Campina Grande (UFCG); mestre e graduado em Engenharia Química, pela UFCG

Endereço profissional: R. Aprígio Veloso, 882 – Universitário, Campina Grande, PB. CEP: 58429-900.

José Nilton Silva

E-mail: nilton@eq.ufcg.edu.br

Doutor e mestre em Engenharia Química, pela Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), licenciado em Química, pela Universidade Estadual da Paraíba (UEPB); e bacharel em Engenharia Química, pela UFCG.

Endereço profissional: Rua Aprígio Veloso, 882. Universitário – Campina Grande, PB. CEP: 58-429900.