

EXTRAÇÃO DE ELEMENTOS TERRAS RARAS DE RESÍDUOS DE PLACA DE CIRCUITO IMPRESSO: INVESTIGAÇÃO DO USO DO ULTRASSOM PARA RECUPERAÇÃO DE Ce, La E Y

EXTRACTION OF RARE EARTH ELEMENTS FROM WASTE OF PRINTED CIRCUIT BOARD: INVESTIGATION OF THE USE OF ULTRASOUND FOR Ce, La, AND Y RECOVERY

EXTRACCIÓN DE ELEMENTOS TIERRAS RARAS DE RESIDUOS DE PLACA DE CIRCUITO IMPRESO: INVESTIGACIÓN DE USO DE ULTRASONIDO PARA RECUPERACIÓN DE Ce, La E Y

165

Agatha Gabrielly Moreira Moura¹
Thaís Lavarda Gatiboni²
Gabrielle Dineck Iop³
Paola de Azevedo Mello⁴

Resumo: Neste trabalho foi investigada a viabilidade do uso do ultrassom para a intensificação do processo de extração de elementos terras raras de resíduos de placas de circuito impresso (WPCB), visando a reciclagem destes elementos, que possuem alto valor agregado e estão presentes em diversos produtos tecnológicos. Os principais parâmetros relacionados ao processo de extração foram avaliados utilizando um planejamento fatorial e um banho de ultrassom operando a 25 kHz. Após a seleção dos parâmetros adequados, outros sistemas de ultrassom, de diferentes frequências e potências também foram avaliados, bem como o uso de agitação convencional (ausência de ultrassom).

Palavras-chave: Ultrassom. Extração. Elementos terras raras. Resíduos de placas de circuito impresso.

¹ Graduanda em Engenharia Química. Universidade Federal de Santa Maria. E-mail: agmouragabrielly@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0002-9883-1069>.

² Pós-graduanda em Engenharia Química. Universidade Federal de Santa Maria. E-mail: thaislavardagatiboni@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0002-5787-9883>.

³ Pós-graduanda em Química. Universidade Federal de Santa Maria. E-mail: gabrielle.iop@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0001-9889-2454>.

⁴ Professora associada. Departamento de Química, Universidade Federal de Santa Maria. E-mail: paola.mello@ufsm.br. <https://orcid.org/0000-0001-9053-2868>.

Abstract: In this work, the feasibility of the use of ultrasound to improve the extraction process of rare earth elements from waste printed circuit boards (WPCBs) was investigated, aiming the recycling of these elements, that have high added value and are present in several technological products. The main parameters related to the extraction process were evaluated by a factorial design, using an ultrasound bath at 25 kHz. After selecting the suitable parameters, other ultrasound systems of several frequencies and power were evaluated as well as a conventional stirring system.

Keywords: Ultrasound. Extraction. Rare earth elements. Waste of printed circuit boards.

Resumen: En este trabajo se investigó la viabilidad de uso del ultrasonido para intensificación del proceso de extracción de elementos tierras raras de residuos de placas de circuito impreso (WPCB), buscando el reciclaje de estos elementos que tienen alto valor agregado y están presentes en diversos productos tecnológicos. Los principales parámetros relacionados al proceso de extracción fueron evaluados utilizándose un planeamiento factorial y un baño de ultrasonido operando a 25 kHz. Después de la elección de los parámetros adecuados, otros sistemas de ultrasonido de diferentes frecuencias y potencias también fueron evaluados, así como el uso de una agitación convencional (ausencia de ultrasonido).

Palabras clave: Ultrasonido. Extracción. Elementos tierras raras. Residuos de placas de circuito impreso.

Submetido 10/10/2020

Aceito 21/11/2020

Publicado 15/12/2020

Introdução

A inovação tecnológica e consequente aumento na demanda por produtos mais modernos e tecnologicamente mais avançados, trouxe como consequência o aumento no descarte de produtos eletroeletrônicos. Estes se tornam rapidamente obsoletos e são substituídos, resultando em acúmulo de resíduos e contribuindo para a poluição do meio ambiente e em consequências para a sociedade em geral (Zhang e Xu, 2016).

Os resíduos eletroeletrônicos incluem uma diversidade de equipamentos, dentre os principais, televisores, geladeiras, celulares, pilhas, baterias e placas de circuito impresso (PCBs, do inglês *printed circuit boards*) (Li, Eksteen e Oraby, 2018; Zhang e Xu, 2016). Na variedade dos produtos eletroeletrônicos descartados diariamente, cuja composição é ampla, as PCBs representam um dos componentes mais complexos, porém um dos mais valiosos. Os resíduos de PCBs (*waste of PCBs*, WPCBs) contém uma diversidade de elementos químicos, incluindo elementos tóxicos como As, Cd, Cr, Hg e Pb, metais valiosos como Au, Ag, Pd e os elementos terras raras (REEs, do inglês *Rare Earth Elements*). Alguns autores consideram que a reciclagem destes a partir dos resíduos possui vantagens significantes como, por exemplo, a menor geração de resíduos e o menor consumo de energia (Li, Eksteen e Oraby, 2018; Tunsu et al., 2015). Ainda, devido aos problemas de poluição decorrentes do descarte indevido destes resíduos eletroeletrônicos e à presença de elementos químicos raros e valiosos, a reciclagem desses materiais e a recuperação e/ou reaproveitamento dos componentes, especialmente dos elementos químicos, torna-se uma alternativa cada vez mais buscada (Isildar et al., 2018; Rosa e Terzi, 2016; Tunsu et al., 2015; Zhang e Xu, 2016).

Dentre os metais valiosos que constituem as PCBs, os REEs representam um grupo composto pelos lantanídeos, Sc e Y, totalizando 17 elementos químicos. Os REEs possuem características físicas e químicas similares entre si e são de grande importância para a indústria tecnológica, estando presentes em baterias recarregáveis, conversores catalíticos, ímãs permanentes, telas de LCD, telefones celulares, e demais produtos tecnológicos (Balaram, 2019; Haque et al., 2014).

Existem diferentes processos descritos na literatura para promover a extração de elementos químicos, como os REEs, de resíduos eletroeletrônicos (Akcil et al., 2015; Dutta et al., 2018; Isildar et al., 2018; Khanna et al., 2018; Li, Eksteen e Oraby, 2018; Rosa e Terzi;

2016; Souza et al., 2018; Tunsu et al., 2015; Zhang e Xu, 2016). Dentre eles destacam-se processos de separação mecânica, processos pirometalúrgicos e hidrometalúrgicos (Akcil et al., 2015; Dutta et al., 2018; Isildar et al., 2018; Khanna et al., 2018; Li, Eksteen e Oraby, 2018; Tunsu et al., 2015; Zhang e Xu, 2016). Embora já consolidados, estes processos apresentam algumas desvantagens inerentes, como baixa eficiência de separação, uso de condições severas de temperatura e/ou de agentes de lixiviação agressivos ao meio ambiente e à saúde humana (Akcil et al., 2015; Dutta et al., 2018; Isildar et al., 2018; Khanna et al., 2018; Li, Eksteen e Oraby, 2018; Tunsu et al., 2015; Zhang e Xu, 2016). Assim, novas tecnologias vêm sendo desenvolvidas e avaliadas no processo de extração de metais de resíduos eletroeletrônicos, buscando um aumento na eficiência de remoção e a utilização de processos mais seguros, com menor consumo de reagentes, condições mais amenas e menores tempos de tratamento, dentre outras peculiaridades.

Dentre os processos e tecnologias alternativas possíveis, está o uso da energia do ultrassom para intensificar o processo de extração de metais (Avvaru et al., 2006; Luque-García e Luque de Castro, 2003; Vyas e Ting, 2017). O ultrassom é uma onda mecânica que se propaga em meios materiais, em frequências superiores a 20 kHz. O entendimento do ultrassom e das interações deste com a matéria é diverso e complexo. Resumidamente, um dos aspectos é que sua passagem em meios líquidos pode promover o fenômeno da cavitação acústica, caracterizada pela formação, crescimento e implosão de microbolhas de gases e vapores. Este fenômeno é considerado o principal responsável pelo aumento da reatividade química do meio sob tratamento, explicada pela geração de altas temperaturas e pressões (da ordem de 5000 °C e 2000 atm) como consequência da implosão das bolhas, bem como pela formação de radicais livres e de microjatos de matéria (Ensminger e Bond, 2011; Mason e Lorimer, 2002).

O sinergismo dos efeitos pode contribuir para aumentar a eficiência de extração de elementos químicos de materiais diversos e isso tem sido demonstrado para a extração de metais como, por exemplo, de ouro (Yu et al, 2020) e de REEs de rochas ígneas (Diehl et al, 2018), para remoção de contaminantes químicos de solos (Mason, Collings e Sumel, 2004) e também para a extração de compostos bioativos (Kumar, Srivastav e Sharanagat, 2020).

Diante desse pressuposto, o emprego do ultrassom pode ser avaliado para extração dos metais presentes em WPCBs. Assim, o objetivo deste trabalho foi investigar o emprego do

ultrassom para a extração ácida de Ce, La e Y de uma amostra de WPCB. Foram avaliados diferentes sistemas de aplicação do ultrassom, com diferentes potências e frequências, sob condições operacionais distintas, tais como tempo, temperatura e razão entre massa de amostra e volume de solução extratora.

Materiais e métodos

Instrumentação

Para avaliação da extração assistida por ultrassom foram utilizados banhos de ultrassom e sistemas *cup horn* de diferentes frequências e potências nominais, conforme é apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 - Sistemas de ultrassom avaliados para o processo de extração de REEs de WPCBs.

Sistema de ultrassom	Frequência (kHz)	Potencia nominal (W)
Banho*	25 ou 45	100
Banho*	37 ou 80	330
Banho*	130	200
<i>Cup horn</i> **	20	130
<i>Cup horn</i> **	20	750

* marca Elma GmbH & Co, Alemanha

** marca Sonics and Materials, Estados Unidos

Para experimentos usando os sistemas de ultrassom do tipo *cup horn* foi utilizado um banho termostático (modelo MCT 110 Plus, Servylab, Brasil) para promover a recirculação da água no sistema e manter a temperatura constante e controlada durante os experimentos.

Um experimento sem o uso do ultrassom, a chamada “condição de silêncio”, foi feito utilizando um agitador mecânico (modelo SL-138/500, Solab, Brasil) com haste homogeneizadora de vidro, operando a 400 rpm e mantendo-se iguais as demais condições experimentais empregadas para extração com ultrassom. Para as extrações com esse sistema de agitação convencional, foi utilizado um banho termostático (modelo NT 249, Novatecnica, Brasil) para controlar a temperatura durante o experimento.

A determinação da concentração total de Ce, La e Y na amostra de WPCBs foi feita de modo a conhecer os valores de referência para a concentração de cada elemento contido na amostra e para isso foi utilizada a espectrometria de massas com plasma indutivamente

acoplado (ICP-MS). O preparo das amostras foi feito utilizando decomposição por via úmida assistida por radiação micro-ondas em um forno (modelo Synthos 3000, Anton Paar, Áustria) equipado com rotor com capacidade para 16 frascos de politetrafluoretileno. Após essa digestão, as soluções foram analisadas em um espectrômetro de massa com plasma indutivamente acoplado (modelo DRC ELAN[®] II; PerkinElmer SCIEX, Estados Unidos). Este foi equipado com um sistema de dessolvatação (modelo ESI APEX-Q; Elemental Scientific, Estados Unidos) para a introdução de amostras líquidas no plasma, utilizado com objetivo de evitar possíveis interferências na determinação. Para a determinação por ICP-MS, as condições operacionais foram utilizadas de acordo com as otimizadas em um trabalho prévio para a determinação de REEs (Gatiboni et al., 2020). A potência de radiofrequência utilizada foi de 1200 W. Argônio (pureza de 99,998%, White Martins, Brasil) foi utilizado como gás para geração do plasma, gás auxiliar e gás para nebulização com vazões de, respectivamente, 15, 1,2 e 1,0 L min⁻¹. Os isótopos usados para a determinação foram ¹⁴⁰Ce, ¹³⁹La e ⁸⁹Y.

Amostras e reagentes

As amostras de WPCBs foram obtidas de depósitos de descarte da própria Universidade. Inicialmente, foram fragmentadas manualmente e moídas em moinho criogênico (modelo 6750 Freezer Mill, Spex Certi Prep., Estados Unidos) resfriado com argônio líquido (White Martins, Brasil).

A água utilizada para o preparo da solução extratora e das soluções padrão foi destilada, deionizada em uma coluna de troca iônica e purificada em um sistema do tipo Milli-Q[®] (Millipore, Estados Unidos). Para o preparo da solução extratora e para a decomposição da amostra de WPCBs foram utilizados HNO₃ 65% m/m e HCl 37% m/m (Merck, Alemanha), os quais foram destilados em um sistema de destilação do tipo sub-ebulição (modelo duoPur 2.10E, Milestone, Itália). Para a determinação dos REEs por ICP-MS foi preparada uma curva de calibração a partir da diluição de uma solução padrão multielementar contendo 10 mg L⁻¹ de Ce, La e Y, além dos demais REEs (Multi-Element Solution 1, CLMS-1, Spex Certi Prep., Estados Unidos) em HNO₃ 5% v/v.

Extração assistida por ultrassom

Para a otimização do método de extração dos REEs de WPCBs, foi proposto um planejamento fatorial do tipo 2^3 com ponto central, no qual foram avaliados: o tempo, a temperatura e a razão entre a massa de material (WPCBs, mg) e o volume de solução extratora (mL). As condições avaliadas nos experimentos estão apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Condições experimentais avaliadas para otimização da extração assistida por ultrassom utilizando planejamento fatorial do tipo 2^3 .

Experimento	Razão m/v (mg/mL)	Temperatura (°C)	Tempo (min)
1	10	30	10
2	20	30	10
3	10	80	10
4	20	80	10
5	10	30	60
6	20	30	60
7	10	80	60
8	20	80	60
9	15	55	35
10	15	55	35
11	15	55	35

Os experimentos foram feitos em um banho de ultrassom de 25 kHz/100 W, usando um frasco de fundo cônico de polipropileno, com capacidade de 15 mL. Ao frasco, foi adicionada uma massa conhecida de amostra de WPCBs e 5 mL da solução extratora (uma mistura de HNO₃ 5% v/v e HCl 9% v/v). Para cada experimento, a temperatura e o tempo foram controlados conforme previsto no planejamento (Tabela 2). Para os experimentos atendendo as razões massa/volume de 10, 15 e 20 mg/mL⁻¹, a massa de amostra utilizada foi de 50, 75 e 100 mg, respectivamente. Ao final dos experimentos as soluções obtidas foram avolumadas com água ultrapura a 15 mL para a determinação de Ce, La e Y por ICP-MS.

Após a otimização do método utilizando o banho de 25 kHz/100 W, a condição experimental que proporcionou a maior eficiência de extração foi aplicada aos demais sistemas de ultrassom, listados na Tabela 1. Para os sistemas do tipo banho de ultrassom, a amplitude empregada foi sempre de 100%. Entretanto, para os sistemas *cup horn*, a amplitude empregada foi de 70%, visto que esta é a amplitude máxima recomendada pelo fabricante.

Extração sem o emprego do ultrassom (condição de silêncio)

Para avaliar a contribuição do ultrassom no processo de extração dos metais da amostra de WPCBs, foi realizado um experimento na ausência do ultrassom, um experimento conhecido como “condição de silêncio” e comumente utilizado para fins de comparação. Para este experimento foi empregada a agitação mecânica (a 400 rpm), para promover a agitação no meio e a homogeneização da solução extratora com a amostra. As condições experimentais empregadas foram as definidas com o planejamento fatorial. Nestes experimentos foi necessário usar um frasco de vidro de capacidade maior (50 mL), já que o frasco que era utilizado nos sistemas de ultrassom possuía um diâmetro menor que a haste do agitador. Conseqüentemente, foi necessário utilizar uma massa maior de amostra e um volume maior de solução extratora e, para manter a razão massa/volume otimizada, foi utilizada uma massa de 400 mg de amostra de WPCBs e 20 mL de solução extratora.

Avaliação da eficiência de extração

Para avaliar a eficiência da extração, a concentração extraída para a fase aquosa nos experimentos de extração com ultrassom foi comparado com um valor de referência, considerado como sendo 100% e representando a concentração do elemento contida na amostra de WPCBs. Para obter o valor de referência nas amostras foi utilizado um método descrito para digestão de materiais com alta concentração de silicato ou outras matrizes complexas (EPA 3052). Para isso foi feita uma decomposição por via úmida assistida por radiação micro-ondas em que, resumidamente, 250 mg de amostra de WPCBs foram pesadas em um frasco de politetrafluoretileno e foi adicionada uma mistura de HNO₃ e HCl concentrados (6 mL de HNO₃ e 3 mL de HCl). Os frascos foram fechados e inseridos no rotor que foi alocado no forno de micro-ondas. A potência do programa utilizado foi de 800 W e o tempo de permanência foi de 10 min, com 20 min de arrefecimento. Ao final do programa, as soluções obtidas foram avolumadas com água ultrapura a 25 mL e a concentração dos elementos foi determinada por ICP-MS.

Resultados

Concentração total de REEs em WPCBs

O conhecimento da concentração de Ce, La e Y na amostra de WPCBs foi necessário para avaliar a eficiência do método de extração, conforme a Sessão “Materiais e Métodos: Avaliação da eficiência de extração”. A concentração de cada REE nas amostras de WPCBs foi determinada por ICP-MS nas soluções obtidas após decomposição. Na Tabela 3 estão descritos os valores obtidos para Ce, La e Y na amostra de WPCBs.

Tabela 3 - Concentração total de REEs em amostra de WPCBs (n=3).

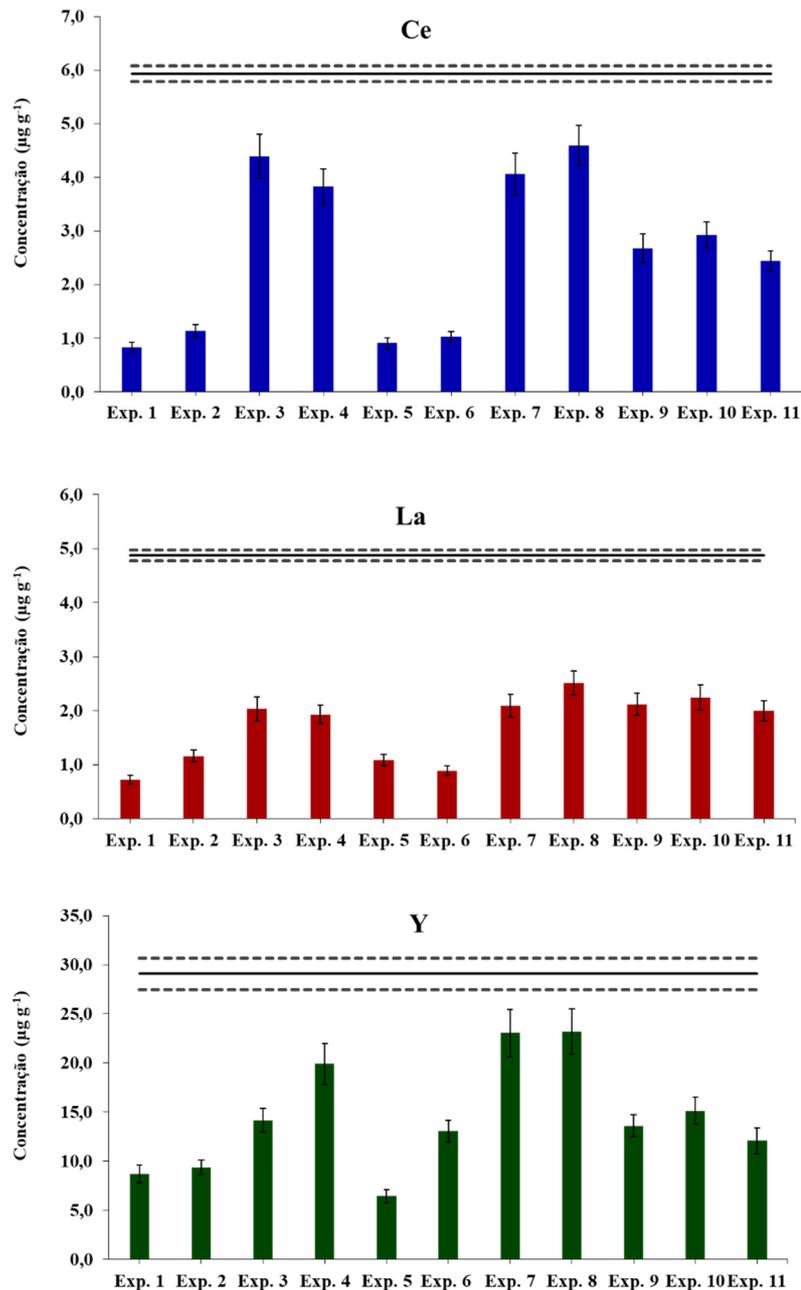
Elemento	Concentração ($\mu\text{g g}^{-1}$)
Ce	$5,93 \pm 0,15$
La	$4,87 \pm 0,07$
Y	$29,0 \pm 1,6$

Com base nessa concentração, da ordem de partes por milhão (ppm), foram avaliadas as condições para a extração assistida por ultrassom, conforme será apresentado a seguir. Cabe informar que tais elementos representam os REEs de maior concentração na amostra, conforme dados experimentais dos autores.

Otimização do método de extração assistida por ultrassom

A otimização do método de extração foi feita por meio de um planejamento fatorial de experimentos utilizando o banho de 25 kHz/100 W, em que os parâmetros que mais influenciam na extração foram avaliados: a razão m/v, a temperatura e o tempo. Os resultados obtidos nos experimentos de 1 a 11 (conforme condições apresentadas na Tabela 2) estão mostrados na Figura 1.

Figura 1- Concentração extraída dos elementos Ce, La e Y de WPCBs para os experimentos de extração assistida por ultrassom conforme o planejamento fatorial.*



* Valor de referência (linha contínua) e desvio padrão do valor de referência (linhas tracejadas).

Analisando os resultados da Figura 1, foi possível observar que a extração foi mais eficiente (melhor recuperação) com o uso de temperaturas mais altas e tempos mais longos de

exposição ao ultrassom. As condições do experimento 8 (razão massa/volume de 20 mg/mL^{-1} , temperatura de $80 \text{ }^\circ\text{C}$ e tempo de 60 min) proporcionaram a obtenção das concentrações mais elevadas de Ce, La e Y extraídas para a fase aquosa, ou seja, as melhores recuperações. Embora o experimento 7, e em menor extensão, os experimentos 3 e 4, também tenham proporcionado melhores resultados, foram escolhidas as condições experimentais do ensaio 8 como condições ótimas, por representar uma condição com uma maior razão m/v, que pressupõe um método mais viável. Portanto as condições do experimento 8, que são razão massa/volume de 20 mg/mL^{-1} , temperatura de $80 \text{ }^\circ\text{C}$ e tempo de 60 min, foram as selecionadas para o método de extração de Ce, La e Y utilizando o ultrassom e foram escolhidas para a avaliação dos demais sistemas.

Avaliação dos diferentes sistemas de ultrassom

A frequência e a potência dos sistemas de ultrassom tem influência direta no fenômeno da cavitação e na energia liberada pelas microbolhas ao implodirem. Assim, foram avaliados banhos de ultrassom de diferentes frequências e potências, com o objetivo de avaliar o desempenho do ultrassom e encontrar qual dos sistemas promove a melhor condição para recuperação dos REEs de WPCBs.

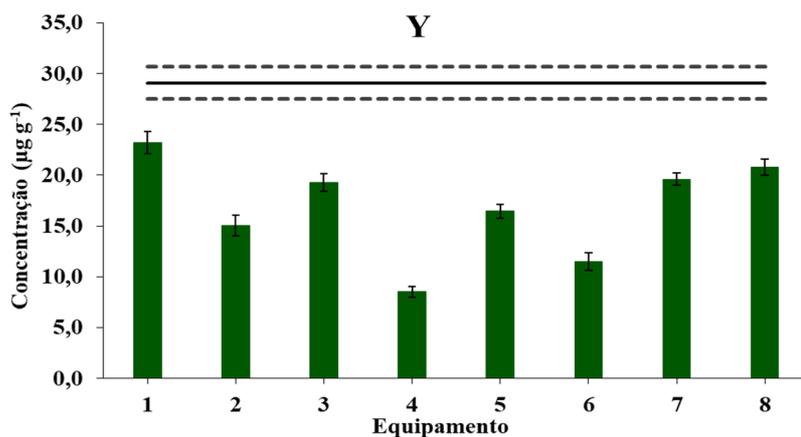
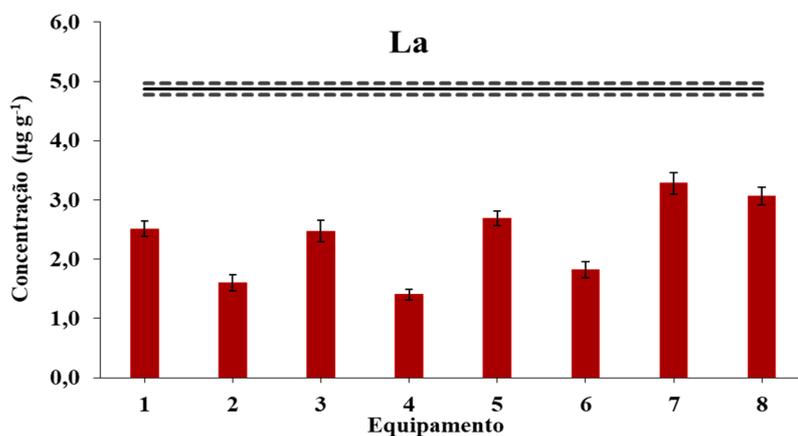
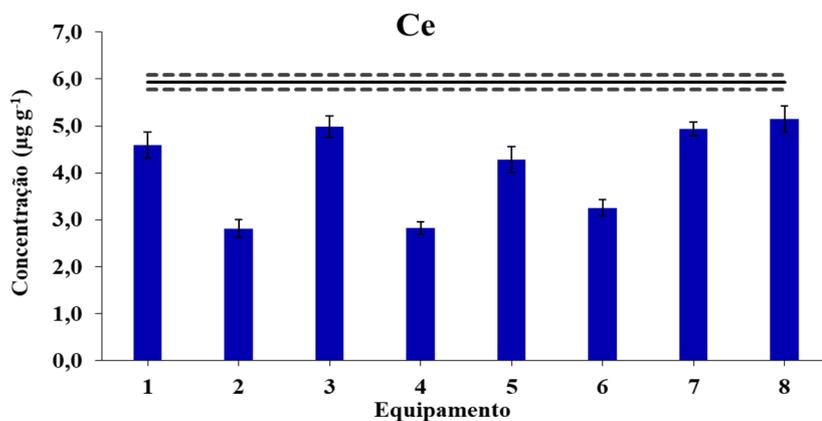
Além dos sistemas do tipo banho de ultrassom, foram avaliados também sistemas *cup horn*. De uso menos disseminado, estes são sistemas de aplicação indireta de ultrassom, assim como os banhos e contrariamente às sondas de ultrassom, que são sistemas de aplicação direta. Os sistemas *cup horn* possuem diferenças em relação ao arranjo dos transdutores e cristais piezoelétricos, responsáveis pela geração da onda ultrassônica. Nos banhos de ultrassom, os cristais piezoelétricos ficam localizados na parte inferior do banho e não entram em contato direto com a solução, que é utilizada para a propagação da onda mecânica. Nos sistemas do tipo *cup horn*, uma sonda de ultrassom, utilizada para a geração das ondas mecânicas, fica localizada no fundo do reator de vidro onde são alocados o material para extração e a solução extratora, entrando em contato direto com essa solução e levando à propagação das ondas. Devido a esta diferença na localização dos dispositivos geradores do ultrassom, e também pelo fato de que o volume das cubas dos sistemas *cup horn* é menor quando comparado ao volume útil das cubas nos banhos de ultrassom, a energia liberada em um sistema *cup horn* é superior, quando

comparada à energia que pode ser liberada nos banhos de ultrassom. Isso impacta diretamente na intensidade disponibilizada ao processo e conseqüentemente nos efeitos esperados.

Usando uma mesma condição de extração (razão massa/volume de 20 mg/mL, temperatura de 80 °C e tempo de 60 min), foram avaliados os banhos de ultrassom de 37, 45, 80 e 130 kHz e os sistemas *cup horn* de 20 kHz/130 W e 20 kHz/750 W. O sistema sem o uso do ultrassom (condição de silêncio), com agitação mecânica de 400 rpm, também foi avaliado para fins de comparação e avaliação da contribuição do ultrassom, utilizando as mesmas condições experimentais.

Os resultados obtidos para todos os sistemas de ultrassom avaliados e também para o sistema com agitação mecânica (condição de silêncio), estão mostrados na Figura 2.

Figura 2 - Concentração de Ce, La e Y extraída de amostra de WPCBs empregando diferentes sistemas de ultrassom ou agitação mecânica (condição de silêncio). Razão massa/volume de 20 mg/mL, temperatura de 80 °C e tempo de 60 min (n=3). Equipamentos: 1 - Banho 25 kHz/100 W, 2 - Banho 45 kHz/100 W, 3 - Banho 37 kHz/330 W, 4 - Banho 80 kHz/330 W, 5 - Banho 130 kHz/200 W, 6 - Sistema *cup horn* 20 kHz/750 W, 7 - Sistema *cup horn* 20 kHz/130 W, 8 - Sem ultrassom (agitação mecânica, 400 rpm).*



* Valor de referência (linha contínua) e desvio padrão do valor de referência (linhas tracejadas).

Comparando o desempenho dos banhos de ultrassom, as maiores concentrações de Ce e Y (melhores recuperações) foram obtidas com os banhos de 25 kHz (equipamento 1) e de 37 kHz (equipamento 3). Para La, o banho de 130 kHz (equipamento 5) foi tão eficiente quanto os banhos de 25 kHz e 37 kHz para promover a remoção deste metal da amostra de WPCBs. Comparando os resultados obtidos para os sistemas *cup horn* é possível observar que o sistema de 130 W (equipamento 7) possibilitou a melhor recuperação para Ce, La e Y. De modo geral, nas condições avaliadas, não foi possível identificar melhores eficiências com o uso do ultrassom já que o processo com agitação mecânica promoveu eficiências de extração similares. Este resultado não permite concluir que o ultrassom não possua efeito no processo, mas pode-se inferir que nas condições avaliadas até o momento a eficiência não é melhorada e mais estudos devem ser conduzidos para a compreensão do processo.

Conclusões

O ultrassom vem sendo amplamente empregado em processos químicos com objetivo de promover um aumento na eficiência dos processos e também redução de custos ou outras vantagens. Assim, o uso do ultrassom, como energia alternativa para intensificação de processos deve ser avaliado e foi investigado neste trabalho para promover a recuperação de elementos terras raras por meio de extração ácida de resíduos de placa de circuito impresso. Foi realizada uma investigação da influência dos principais parâmetros que interferem no processo de extração de Ce, La e Y por meio de um planejamento fatorial, em que as condições selecionadas foram: razão massa/volume de 20 mg/mL, temperatura de 80 °C e tempo de 60 min. Considerando estas condições e sistemas de ultrassom distintos, as maiores recuperações foram obtidas usando um banho de 25 kHz (para Y) e um sistema *cup horn* de 20 kHz/130 W (para La e Ce). O sistema convencional utilizado para fins de simulação da “condição de silêncio” (sem ultrassom, agitação mecânica, 400 rpm) foi tão eficiente quanto os sistemas de ultrassom, nas condições avaliadas. Outras condições experimentais, o uso de outras soluções extratoras ambientalmente mais amigáveis e o uso de sistemas de ultrassom de aplicação direta (sondas) devem ser avaliados para uma melhor compreensão do processo de extração e da contribuição do ultrassom neste método.

Referências

AKCIL, A.; ERUST, C.; GAHAN, C. S.; OZGUN, M.; SAHIN, M.; TUNCUK, A. Precious metal recovery from waste printed circuit boards using cyanide and non-cyanide lixivants - A review. *Waste Management*, v. 45, p. 268-271, 2015. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X15000549>. Acesso em: 04 out. 2020.

AVVARU, B.; ROY, S. B.; CHOWDHURY, S.; HAREENDRAM, K. N.; PANDIT, A. B. Enhancement of the leaching rate of uranium in the presence of ultrasound. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, v. 45, p. 7639 - 7648, 2006. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/ie060599x>. Acesso em: 06 out. 2020.

BALARAM, V. Rare earth elements: A review of applications, occurrence, explorations, analysis, recycling, and environmental impact. *Geoscience Frontiers*, v. 10, p. 1285-1303, 2019. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1674987119300258>. Acesso em: 09 out. 2020.

DIEHL, L. O.; GATIBONI, T. L.; MELLO, P. A.; MULLER, E. I.; DUARTE, F. A.; FLORES, E. M. M. Ultrasound-assisted extraction of rare-earth elements from carbonatite rocks. *Ultrasonics Sonochemistry*, v. 40, p. 24-29, 2018. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1350417717301761>. Acesso em: 09 out. 2020.

DUTTA, D.; PANDA, R.; KUMARI, A.; GOEL, S.; JHA, M. K. Sustainable recycling process for metals recovery from used printed circuit boards (PCBs). *Sustainable Materials and Technologies*, v. 17, p. e00066, 2018. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214993717301641>. Acesso em: 04 out. 2020.

ENSMINGER, D.; BOND, L. J. *Ultrasonics: Fundamentals, Technologies and Applications*. Boca Raton: CRC Press, 3 ed. 2011. 765 p.

EPA 3052. Disponível em: www.epa.gov/sites/production/files/2015-12/documents/3052.pdf. Acesso em: 27 set. 2020.

GATIBONI, T. L.; IOP, G. D.; DIEHL, L. O.; FLORES, E. M. M.; MULLER, E. I.; MELLO, P. M. An ultrasound-assisted sample preparation method of carbonatite rock for determination of rare earth elements by inductively coupled plasma mass spectrometry. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, v. 3, n. S3, p. e8732, 2020. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/rcm.8732>. Acesso em: 27 set. 2020.

HAQUE, N.; HUGHES, A.; LIM, S.; VERNON, C. Rare Earth Elements: Overview of Mining, Mineralogy, Uses, Sustainability and Environmental Impact. *Resources*, v. 3, p. 614-635, 2014. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2079-9276/3/4/614>. Acesso em: 24 set. 2020.

ISILDAR, A.; RENE, E. R.; VAN HULLEBUSCH, E. D.; LENS, P. N. L. Electronic waste as a secondary source of critical metals: Management and recovery technologies. *Resources, Conservation & Recycling*, v. 135, p. 296-312, 2018. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344917302100>. Acesso em: 09 out. 2020.

KHANNA, R.; ELLAMPARUTHY, G.; CAYUMIL, R.; MISHRA, S. K.; MUKHERJEE, P. S. Concentration of rare earth elements during high temperature pyrolysis of waste printed circuit boards. *Waste Management*, v. 78, p. 602-610, 2018. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X18303933>. Acesso em: 09 out. 2020.

KRUG, J. F. Métodos de preparo de amostras: fundamentos sobre preparo de amostras orgânicas e inorgânicas para análise elementar. Piracicaba: SBQ, 2008. 340p.

KUMAR, K.; SRIVASTAV, S.; SHARANAGAT, V. S. Ultrasound assisted extraction (UAE) of bioactive compounds from fruit and vegetable processing by-products: A review. *Ultrasonics Sonochemistry*, v. 70, 2020. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1350417720309950>. Acesso em: 28 set. 2020.

LI, H.; EKSTEEN, J.; ORABY, E. Hydrometallurgical recovery of metals from waste printed circuit boards (WPCBs): Current status and perspectives - A review. *Resources, Conservation & Recycling*, v. 130, p. 122-139, 2018. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092134491830288X>. Acesso em: 07 out. 2020.

LUQUE-GARCÍA, J. L.; LUQUE de CASTRO, M. D.; Ultrasound: a powerful tool for leaching. *Trends in Analytical Chemistry*, v. 22, n.1, 2003.

MASON, T. J.; COLLINGS, A.; SUMEL, A. Sonic and ultrasonic removal of chemical contaminants from soil in the laboratory and on a large scale. *Ultrasonics Sonochemistry*, v. 11, p. 205-210, 2004. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1350417704000252>. Acesso em: 27 set. 2020.

MASON, T. J.; LORIMER, J. P. Applied Sonochemistry: The uses of power ultrasound in chemistry and processing. Weinheim: Wiley VCH, 2002. 314 p.

ROSA, P.; TERZI, S. Comparison of current practices for a combined management of printed circuit boards from different waste streams. *Journal of Cleaner Production*, v. 137, p. 300-312, 2016. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652616309854>. Acesso em: 05 out. 2020.

SOUZA, W. B.; ABREU, C. S.; RODRIGUES, G. D.; MAGESTE, A. B.; LEMOS, L. R. Selective separation of Cu, Ni and Ag from printed circuit board waste using an

environmentally safe technique. *Journal of Environmental Management*, v. 226, p. 76-82, 2018. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479718309204>. Acesso em 09 out. 2020.

TUNSU, C.; PETRANIKOVA, M.; GERGORIC, M.; EKBERG, C; RETEGAN T. Reclaiming rare earth elements from end-of-life products: A review of the perspectives for urban mining using hydrometallurgical unit operations. *Hydrometallurgy*, v. 156, p. 239-258, 2015. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304386X15300311>. Acesso em: 13 out 2020.

VYAS, S.; TING, Y. A review of the application of ultrasound in bioleaching and insights from sonication in (bio)chemical processes. *Resources*, v.7, n,3, 2018. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2079-9276/7/1/3>. Acesso em 05 out. 2020.

YU, S.; YU, T.; SONG, W.; YU, X.; QIAO, J.; WANG, W.; DONG, H.; WU, Z.; DAI, L.; LI, T. Ultrasound-assisted cyanide extraction of gold from gold concentrate at low temperature. *Ultrasonics Sonochemistry*, v. 64, 2020. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1350417719316815>. Acesso em 07 out. 2020.

ZHANG, L.; XU, Z. A review of current progress of recycling technologies for metals from waste electrical and electronic equipment. *Journal of Cleaner Production*, v. 127, p. 19-36, 2016. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652616302451>. Acesso em: 26 set. 2020.