

PROCESSAMENTO BIOHIDROMETALÚRGICO: RECUPERAÇÃO DE METAIS PROVENIENTE DE RESÍDUOS ELETROELETRÔNICOS COM O USO DE BACTÉRIAS*

Solange Kazue Utimura¹
Carlos Gonzalo Alvarez Rosário²
Viviane Tavares de Moraes³
Jorge Alberto Soares Tenório⁴
Denise Croce Romano Espinosa⁵

Resumo

As placas de circuito impresso (PCIs) dos resíduos eletroeletrônicos (REEEs) possuem diversos metais na composição. A recuperação desses metais tem incentivado as pesquisas inovadoras no seu processo de extração. Como alternativa de recuperação de metais das PCIs de forma sustentável optou-se pela biohidrometalurgia envolvendo a fase extração. O presente trabalho avalia a biolixiviação do cobre na presença de duas cepas bacterianas distintas em PCIs de REEEs provenientes de impressoras obsoletas. As PCIs foram caracterizadas mediante as técnicas analíticas de espectrometria ICP-OES e de fluorescência de Raios X (FRX) para determinar os elementos químicos presentes na amostra inicial. As cepas utilizadas na lixiviação bacteriana foram *Acidithiobacillus ferrooxidans* (AF) e *Leptospirillum ferrooxidans* (LF), cultivadas em meio de cultura T&K. Os ensaios de biolixiviação foram realizados em incubadora orbital, com velocidade de rotação de 170 rpm, temperatura de 30 °C, volume de inóculo de 10% (v/v) e densidade de polpa de 30g/L. A técnica empregada na concentração de cobre da solução após a biolixiviação foi a FRX. Foi possível determinar que a cepa AF apresentou uma extração de 100% de cobre em 8 dias em comparação com a LF na qual foi observado que a extração de cobre foi de 100% em 5 dias.

Palavras-chave: Resíduos eletroeletrônicos; Placas de Circuito Impresso; Biolixiviação; Bactérias.

BIOHYDROMETALLURGICAL PROCESSES: RECOVERY METALS FROM ELECTRONIC SOLID WASTE USING MESOPHILIC BACTERIA

Abstract

The printed circuit boards (PCIs) of electronic waste (WEEE) in the composition can be found several elements and chemical substances including metals. The recovery of metals from PCIs involves the extraction by biohydrometallurgy processes. The present work evaluates the bioleaching of copper in the presence of two distinct bacterial strains in PCIs from obsolete printers. The PCIs were characterized by analytical spectrophotometric techniques (ICP-OES) and X-ray fluorescence (FRX) to determine the chemical elements present in the sample. The strains used in bacterial leaching were *Acidithiobacillus ferrooxidans* (AF) and *Leptospirillum ferrooxidans* (LF), cultivated in T & K culture medium. The bioleaching experiments were performed in an orbital incubator with a rotation speed of 170 rpm, a temperature of 30 °C, inoculum volume of 10% (v / v) and pulp density of 30 g / l. The results show that copper recovery from PCIs using *Acidithiobacillus ferrooxidans* (AF) was 100 % in 8 days and with *Leptospirillum ferrooxidans* (LF) was 100 % in 5 days.

Keywords: Electrical and Electronic Waste; Printed Circuit Board; Bioleaching; Bacterias.

* Contribuição técnica ao 72º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 17º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, parte integrante da ABM Week, realizada de 02 a 06 de outubro de 2017, São Paulo, SP, Brasil.

- ¹ *Engenharia Química, Doutoranda, Departamento de Engenharia Química, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil.*
- ² *Engenheiro Industrial, Doutorando, departamento de Engenharia Química, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil.*
- ³ *Engenheira Ambiental, Doutora, Pós-Doutoranda, Departamento de Engenharia Química, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil.*
- ⁴ *Engenheiro Metalurgista, Doutor, Professor Titular, Departamento de Engenharia Química, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil*
- ⁵ *Engenheira Metalurgista, Doutora, Professora Associada, Departamento de Engenharia Química, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil.*

1 INTRODUÇÃO

A geração mundial de resíduos eletroeletrônicos em 2014 cresceu a uma taxa de 41,8 milhões de toneladas e com previsão de crescimento de cerca de 50 milhões de toneladas em 2018 [1]. A sucata eletrônica é formada por diversos equipamentos ou partes deles e por diferentes componentes que por sua vez são compostos por vários elementos e substâncias químicas [2,3]. As placas de circuito impresso (PCIs) são componentes dos equipamentos eletroeletrônicos e são compostas por metais que podem ser reciclados [4,5]. Uma das tecnologias para a solubilização dos metais, tem-se a biolixiviação que faz o uso de microrganismos e o produto do processo, forma-se um liquor de lixiviação com os metais solubilizados que podem ser recuperados por processos de extração por solvente e/ou eletrodeposição [6].

A biohidrometalurgia engloba os processos com a participação dos microrganismos e tem como base, as interações químicas e/ou físicas entre os microrganismos com os subprodutos e o substrato [7]. A biolixiviação encontra-se nesses processos de interação, no qual os metais de fontes inorgânicas são solubilizados por intermédio da ação de microrganismos [8]. A lixiviação bacteriana de metais pode ser aplicada em fontes secundárias no tratamento de resíduos como o lodo de galvanização, cinzas e sedimentos, pilhas e baterias, catalisadores e misturas de resíduos metálicos, lama vermelha e solo, rejeito de fundição de cobre e outros [9].

A oxidação do substrato pela ação bacteriana acontece com a ação dos microrganismos que são capazes de oxidar íons ferrosos e/ou compostos sulfurados e pode ocorrer através dos mecanismos: direto e indireto [10]. O mecanismo direto acontece da interação entre a bactéria com a superfície do substrato e no mecanismo indireto, a reação de oxidação do substrato acontece com a ação do íon férrico, uma vez que o íon ferroso é reoxidado a íon férrico pela ação das bactérias e o íon férrico regenerado retorna a oxidar o substrato [11].

Os microrganismos capazes de oxidar ferro, utilizados no presente estudo, foram *Acidithiobacillus ferrooxidans* e *Leptospirillum ferrooxidans*. Estas bactérias mesofílicas (temperatura ideal de crescimento 30 a 40 °C) satisfazem as necessidades energéticas por meio da oxidação de íons ferrosos e catalisam o processo de oxidação para a solubilização dos metais [12].

A primeira etapa do processo deve-se à caracterização das PCIs com o intuito de determinar os elementos químicos presentes na amostra inicial. A segunda etapa do processo deve-se à adaptação bacteriana que trata do cultivo sucessivo das bactérias com doses crescentes do resíduo [13]. A inoculação sucessiva e o incremento crescente de resíduo pode elevar a velocidade de oxidação no substrato e permite aumentar a tolerância às concentrações dos metais solubilizados durante o processo da biolixiviação [14]. A contínua adaptação das bactérias pode contribuir com uma diminuição no tempo de residência e no aumento da densidade de polpa na biolixiviação [15].

Outros fatores devem ser levados em consideração, como o tamanho da partícula e área superficial do substrato a ser oxidado, temperatura, pH, potencial de oxido-redução, oxigênio e dióxido de carbono disponíveis, quantidade de nutrientes e a maneira como os metais estão disponibilizados para o processo de biolixiviação [16]. O objetivo do presente estudo foi avaliar e comparar o desempenho da cepa *Acidithiobacillus ferrooxidans* e da cepa *Leptospirillum ferrooxidans* na lixiviação bacteriana de cobre usando PCIs provenientes de impressoras obsoletas.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Caracterização das Placas de Circuito Impresso (PCIs)

As amostras utilizadas nos ensaios foram obtidas de PCIs provenientes de impressoras obsoletas coletadas no CEDIR (Centro de Descarte e Reuso de Resíduos de Informática da USP). As PCIs foram desmontadas manualmente e cortadas em uma guilhotina no tamanho de cerca de 20x30 cm. Em seguida, as PCIs cortadas foram cominuídas em um moinho de martelos modelo MDM 18/18 da marca Astecma em duas grelhas: primeiro em grelha de 9 mm de abertura e em seguida de 6 mm. O processamento de cominuição continuou em um moinho de facas (Rone FA 2305) em grelha de 2 mm de abertura.

As amostras de PCIs foram quarteadas antes da análise granulométrica de acordo com a Norma ABNT NBR 10007:2004 e separadas em amostras de 5 g. Foram então classificadas por peneiramento durante 20 minutos, em peneiras vibratórias de aberturas: 4mm, 2mm, 1mm, 0,5 mm, 0,25 mm, 0,125 mm e 0,075 mm e 0,038 mm. As amostras (< 2 mm) foram novamente quarteadas e separadas em amostras de 5 g, sendo depois, solubilizadas em água-régia numa relação sólido/líquido de 1/20 durante um período de tempo de 24 horas a temperatura ambiente.

Em seguida foi feita a filtração da solução em papel de filtro quantitativo, obtendo o licor lixiviado. A quantidade de metais presentes nas PCIs foi determinada pela análise química da fração solubilizada da lixiviação em água régia. A técnica empregada foi espectrometria de emissão atômica por plasma acoplado (ICP-OES, Agilent Technologies – 700 Series) e a fluorescência de raio X (FRX, PANalytical – Epsilon3-XL).

2.2 Crescimento e Adaptação Bacteriana

Os microorganismos usados nos ensaios de lixiviação bacteriana correspondem a duas cepas distintas de *Acidithiobacillus ferrooxidans* e *Leptospirillum ferrooxidans* adquiridas do Banco de Microrganismos e Culturas Celulares do Instituto Leibniz DSMZ da Alemanha. Para o procedimento de inoculação, foi preparado o meio de cultura T&K composto pela solução A e B nas seguintes quantidades: solução A: 0,625 g/L (NH₄)₂SO₄, 0,625 g/L K₂HPO₄, 0,625 g/L MgSO₄.7H₂O e solução B: 166,5 g/L FeSO₄.7H₂O. As soluções A e B foram aciduladas no pH 1,8 com ácido sulfúrico (H₂SO₄) 5M. A solução A foi esterilizada durante 30 minutos a 1 atm e a 121 °C em uma autoclave vertical. A solução B foi esterilizada no sistema de filtração Millipore com papel de filtro de 0,2 µm. O preparo do meio de cultura T&K consistiu na mistura das duas soluções na proporção de 4:1 (soluções A : B).

O processo de inoculação foi realizado em erlenmeyer de 250 mL contendo 72 mL de solução A, 18 mL de solução B e 10 mL da cepa bacteriana (inóculo de 10 % (v/v)). O procedimento foi realizado em uma incubadora orbital (Infors HT) com rotação de 170 RPM e temperatura de 30 °C. A inoculação foi realizada pelo método de repiques sequencial, no qual era feito um novo repique assim que o potencial redox (Hanna - E, mV vs Ag/AgCl) atingia o valor acima de 600 mV. O processo de crescimento foi realizado em 3 repiques sequenciais por bactéria com o monitoramento do potencial de oxirredução para valores acima de 600 mV.

As bactérias *Acidithiobacillus ferrooxidans* e a *Leptospirillum ferrooxidans* foram adaptadas a diferentes concentrações de PCIs pelo método do cultivo sucessivo. O

meio de cultura empregado foi o T&K e as condições do processo de adaptação foram as mesmas mencionadas acima no processo de crescimento. O procedimento de adaptação ocorreu após o crescimento das bactérias e com a adição crescente das amostras de PCIs até uma densidade de polpa de 30 g/L. Fez-se o controle e o monitoramento do pH (modelo mPA – 210) e do Eh (mV) durante o processo de adaptação bacteriana.

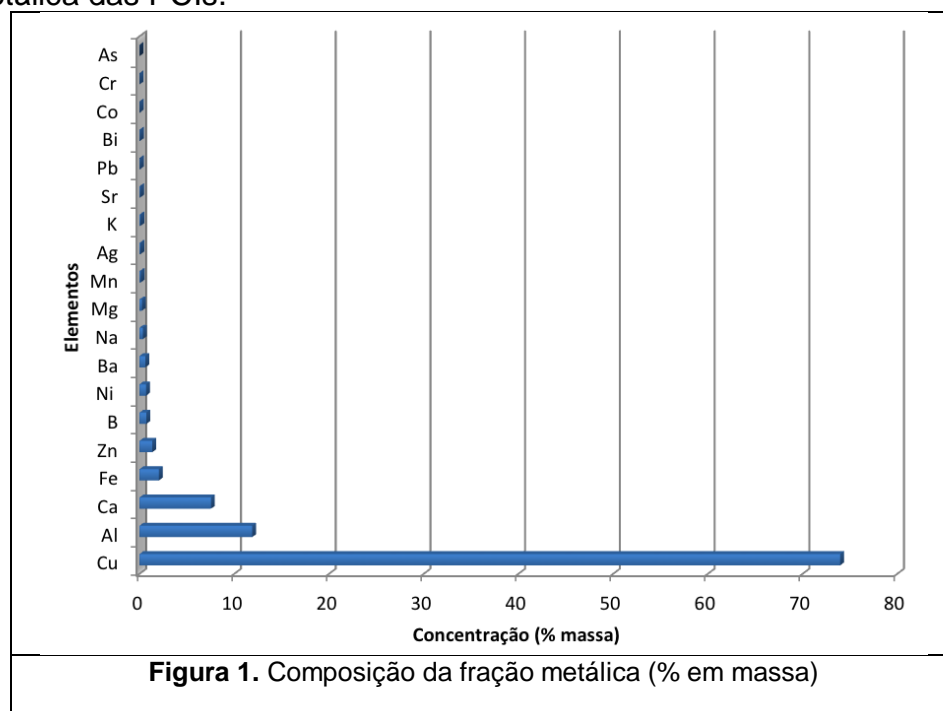
2.3 Ensaios de Lixiviação Bacteriana

Os ensaios de lixiviação bacteriana iniciaram com as bactérias pré-adaptadas em PCIs. Os ensaios foram realizados em erlenmeyer de 500 mL com 270 mL de solução T&K e 30 mL de inóculo contendo a bactéria pré-adaptada em PCIs. O procedimento foi realizado em uma incubadora orbital com velocidade de rotação de 170 RPM e temperatura de 30 °C. Após 72 horas de crescimento foi monitorado o potencial de oxidação para verificar o valor acima de 600 mV. Nesta fase, adicionou-se 9 g de PCIs e após 24 horas mediu-se o potencial de oxidação e ajustou-se o pH em 1,8 com H₂SO₄. O processo de biolixiviação foi realizado durante 15 dias e foi retirada uma amostra diária para determinar a concentração de cobre através da análise química pela técnica de espectrometria de Fluorescência de Raio-X (FRX).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Caracterização das PCIs

Para determinar a composição das PCIs foi realizado o ensaio de lixiviação em meio ácido que permitiu quantificar a fração metálica. A análise química realizada com o licor da lixiviação ácida indicou os elementos presentes nas PCIs e a concentração de cada um deles. A Figura 1 mostra as concentrações dos elementos presentes na parte metálica das PCIs.

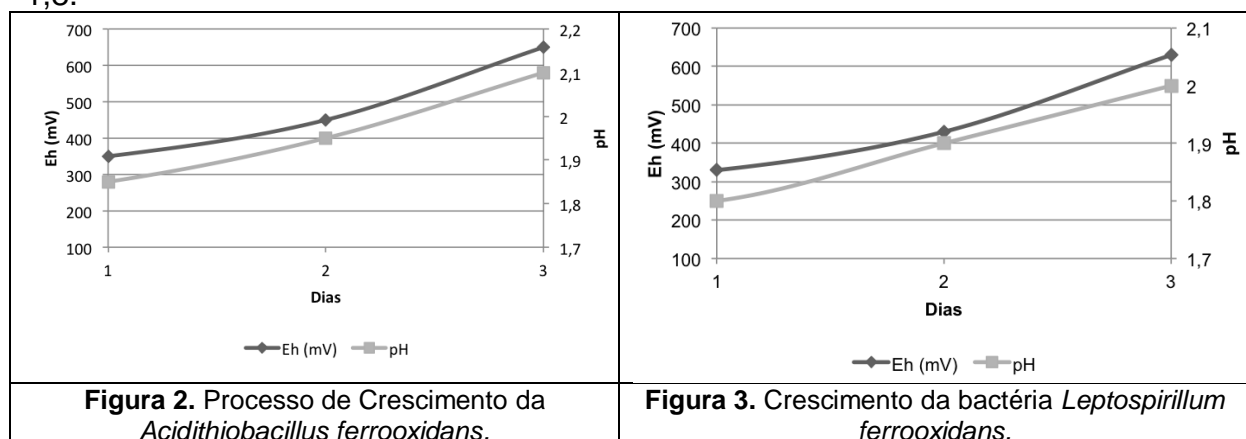


Os ensaios de lixiviação com água régia quantificaram a fração metálica das PCIs que foi de 46,82 % e a diferença da fração de 53,18 % corresponderam a porcentagem de material polimérico e cerâmico.

Entre os elementos analisados na fração metálica, pode-se destacar que o cobre foi o metal que apresentou o maior percentual em massa de (73,98 %). Os elementos analisados estão de acordo com a ordem de grandeza em percentual em massa maior que 1 % que foram o alumínio (11,90 %), o cálcio (7,54 %), o ferro (2,05 %) e o zinco (1,35 %). Os demais metais que se encontraram com o percentual menor que 1 % são o níquel (0,70 %), a prata 0,11 %, entre outros. Não foram encontrados os metais como o cádmio e o arsênio que podem afetar as bactérias e ser inibidores de crescimento. De acordo com Frenay (1985), alguns valores máximos de cátions metálicos são tolerados pela bactéria *Acidithiobacillus ferrooxidans* como: Fe (160 g/L), Zn (119 g/L), Ni (72 g/L), Cu (55 g/L), Cr (0,8 g/L), Ag (0,05 g/L). Para os ânions de arsenieto, seleneto e telureto, estes elementos são nocivos para a *Thiobacillus ferrooxidans* em concentrações de 50 a 100 mg/L e o molibdato na concentração de 5 mg/L [17].

3.2 Etapas de Crescimento e Adaptação Bacteriana

As Figuras 2 e 3 mostram o processo de crescimento das bactérias *Acidithiobacillus ferrooxidans* e *Leptospirillum ferrooxidans* após a inoculação em meio T&K em pH 1,8.

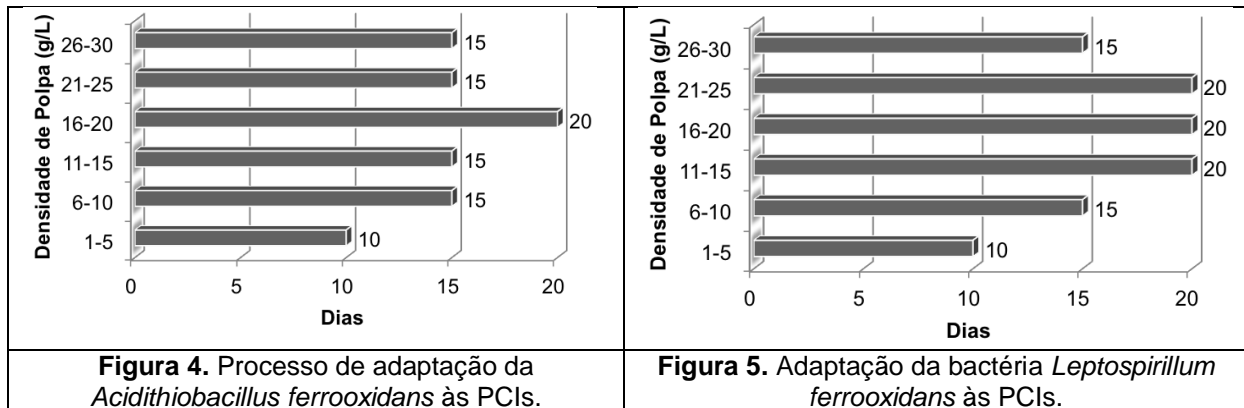


Na inoculação de 10 % (v/v) da *Acidithiobacillus ferrooxidans* em meio T&K com pH 1,8 apresentou um Eh de 350 mV no primeiro dia de crescimento, na incubadora orbital com velocidade de rotação de 170 RPM e temperatura de 30 °C. Após 72 horas de crescimento, apresentou o resultado de pH 2,1 e Eh 650 mV. Foi feita a contagem das bactérias pelo método do número mais provável (NMP) e pela contagem direta no microscópio com a câmara de Neubauer e foi encontrado 1×10^6 células por mL.

No processo de inoculação de 10 % (v/v) da *Leptospirillum ferrooxidans* nas mesmas condições da *Acidithiobacillus ferrooxidans*, apresentou no primeiro dia de crescimento o pH 1,8 e Eh 310 mV. Após 72 horas de crescimento, apresentou pH 2 e Eh 620 mV. A contagem das bactérias pelos métodos do NMP e da contagem direta no microscópio foi encontrado 1×10^6 células por mL.

Após o processo de crescimento, iniciou a etapa de adaptação das bactérias às amostras de PCIs, de acordo com Attia (1989) e Modak (1995), o cultivo sucessivo dos microrganismos com doses crescentes de substratos incrementa a velocidade

da atividade bacteriana [18]. A adaptação bacteriana é uma parte importante da conduta metabólica, uma vez que a bactéria reconhece e responde às mudanças de condições do meio como a concentração de substratos, carência de nutrientes e elementos tóxicos [19]. As Figuras 4 e 5 mostram o processo de adaptação das bactérias em estudo às PCIs.



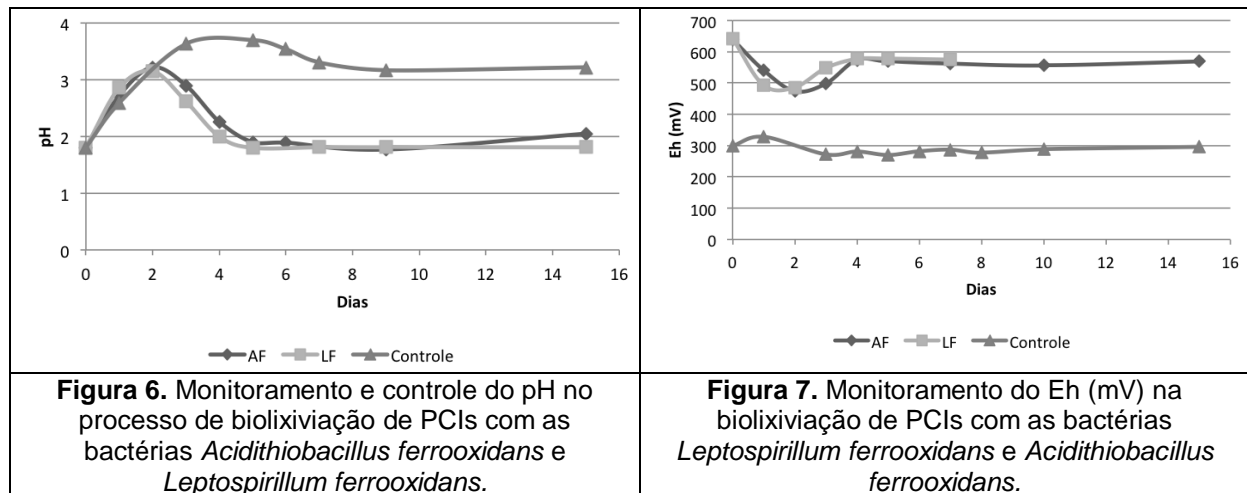
A Figura 4 mostra a etapa de adaptação da bactéria *Acidithiobacillus ferrooxidans* às amostras de PCIs. O processo de adaptação foi dividido em faixas de densidade de polpa (g/L) e o tempo necessário para a adaptação das bactérias em cada faixa de concentração de PCIs. No início do processo, a bactéria *Acidithiobacillus ferrooxidans* necessitou de 10 dias para se adaptar à faixa de concentração de PCIs de 1 a 5 g/L. O tempo total necessário para a adaptação da *Acidithiobacillus ferrooxidans* às PCIs até a concentração de 30 g/L foi de 90 dias.

A Figura 5 mostra a fase de adaptação da *Leptospirillum ferrooxidans* às PCIs e o processo de adaptação também foi dividido em faixas de concentração por densidade de polpa (g/L) das PCIs em função do tempo. No começo do período de adaptação da *Leptospirillum ferrooxidans* também foi necessário 10 dias de adaptação na faixa de concentração de 1 a 5 g/L de PCIs. O tempo total necessário para a adaptação da *Leptospirillum ferrooxidans* na faixa de concentração de 30 g/L de PCIs foi de 100 dias.

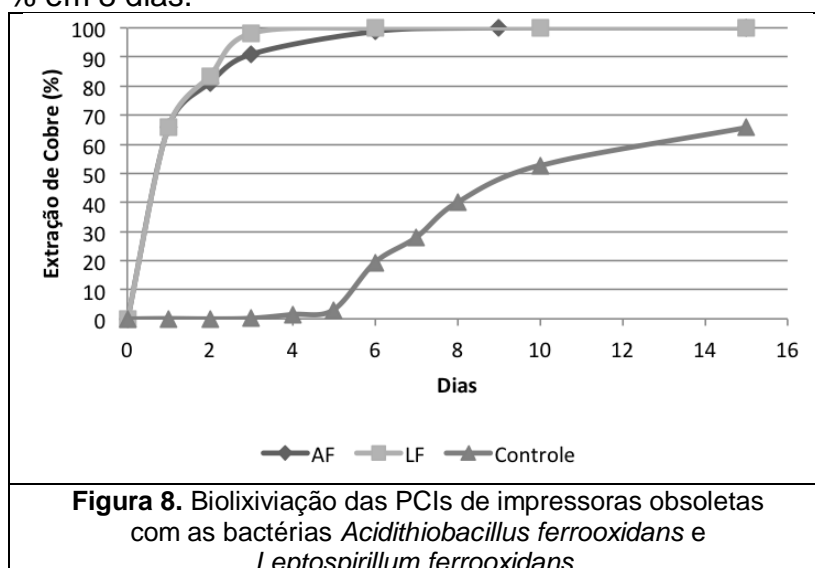
A adaptação das bactérias a doses crescentes de substrato aumenta a tolerância às concentrações maiores dos metais solúveis formados durante o processo de biolixiviação. De acordo com Modak (1995), o mecanismos de adaptação das bactérias, pode ser considerado como sendo o cultivo repetitivo de células tolerantes na presença de substâncias metálicas até que toda a população torna-se tolerante ao substrato [19].

3.3 Experimentos de Lixiviação Bacteriana

No ensaio de biolixiviação das PCIs para a extração de cobre, foram monitorados o pH e o Eh (mV) com o ajuste do pH com H₂SO₄. As Figuras 6 e 7 mostram a variação do pH e do Eh (mV) das bactérias em estudo.



De acordo com a Figura 6, o pH com as bactérias estudadas tem o mesmo comportamento com o decorrer do tempo. No início do processo de biolixiviação o pH aumentou para valores acima de 3 e foi necessário o ajuste com H_2SO_4 . Conforme Brandl (2001), o resíduo eletroeletrônico pode apresentar caráter alcalino contribuindo no aumento do pH e a precipitação de íons férricos na forma de hidróxidos férricos [20]. A solubilização dos metais está relacionado com a concentração de Fe^{3+} em solução que por sua vez, está diretamente relacionada com o potencial de oxirredução. Desta maneira, quanto maior a concentração de íons férricos em solução, maior o valor do Eh [9]. A Figura 7 mostra os valores do potencial de oxirredução no processo de biolixiviação das PCIs com as bactérias em estudo. O comportamento do Eh com as bactérias estudadas foi o mesmo durante a lixiviação bacteriana. No começo da biolixiviação das PCIs, ocorreu uma queda nos valores do Eh da solução, que pode estar relacionado com a concentração de Fe^{3+} em solução. Após a estabilidade do pH no processo da lixiviação bacteriana, ocorreu um aumento nos valores de Eh da solução e estabilizam em valores acima de 500 mV. Deveria haver um excesso de ferro na solução para garantir o aumento nos valores do Eh da solução e a perda de íons férricos por precipitação. A Figura 8 mostra a lixiviação bacteriana nas PCIs provenientes de impressoras descartadas. A bactéria *Leptospirillum ferrooxidans* mostrou uma extração de cobre de 100 % em 5 dias enquanto que com a *Acidithiobacillus ferrooxidans* apresentou uma extração de cobre de 100 % em 8 dias.



4 CONCLUSÃO

O cultivo das bactérias *Acidithiobacillus ferrooxidans* e *Leptospirillum ferrooxidans* apresentou crescimento bacteriano e atingiu a maior concentração celular após 3 dias de inoculação a 30°C e 170 RPM em pH 1,8. Desta maneira padronizou-se o crescimento do cultivo nestas condições.

Através dos experimentos de adaptação de PCIs com as bactérias foi possível determinar que a concentração tolerável pelos microrganismos foi 30 g/L de PCIs proveniente de impressoras obsoletas. O período total de adaptação em PCIs com uma densidade de polpa de 30 g/L para a *Acidithiobacillus ferrooxidans* foi de 105 dias e para a *Leptospirillum ferrooxidans* foi de 115 dias. No entanto, observou-se que variações na concentração de resíduo alteram significativamente o tempo de adaptação.

O ensaio de lixiviação bacteriana de PCIs permitiu concluir que a bactéria *Acidithiobacillus ferrooxidans* apresentou uma extração de cobre de 100% em 8 dias, enquanto que com a bactéria *Leptospirillum ferrooxidans* a extração de cobre foi de 100% em 5 dias.

O presente trabalho confirmou a capacidade de lixiviação bacteriana de cobre em escala laboratorial da bactéria *Acidithiobacillus ferrooxidans* e permitiu avaliar o desempenho da cepa *Leptospirillum ferrooxidans*. Mostrou ser um processo promissor que pode ser desenvolvido a nível industrial.

Agradecimentos

Os autores agradecem pelo suporte financeiro do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ) nos processos: 141086/2015-7 e 870243/1997-7; Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo no processo: 2012/51871-9, pelas bolsas concedidas de doutorado aos participantes deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- 1 Baldé, C.P., Wang, F., KuEhr, R., Huisman, J. (2015), The global e-waste monitor – 2014, United Nations University, IAS – SCYCLE, Bonn, Germany.
- 2 Espinosa, D. C. R. Reciclagem de baterias de níquel-cádmio. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, p.1-30, 2002.
- 3 Menetti, R.P.; Chaves, A. P.; Tenório, J. A. S. Obtenção de concentrados metálicos não-ferrosos a partir de sucata eletrônica. In:Anais do 51º Congresso Anual da ABM. Porto Alegre, RS. Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, v. 4, 1996.
- 4 Moraes, V.T.Recuperação de Metais a Partir do Processamento Mecânico e Hidrometalúrgico de Placas de Circuito Impresso de Celulares Obsoletos, p. 1-9. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo. 2011.
- 5 Bassan, G. C. Caracterização de Placas de Circuito Impresso de Computador e Estudo da Biolixiviação para a Solubilização da Fração Metálica. (Monog.)Tecnologia em Processos Ambientais. Faculdade SENAI de Tecn. Ambiental. SBC. SP, p. 71, 2014.
- 6 Gupta, C.K. Bacterial Leaching. Chemical Metallurgy: Principles and Practice, 2003. Wiley – VCH Verlag GMBH&Co.RGaA, p. 496-499.
- 7 Garcia Jr., O. Estudos da biolixiviação de minérios de urânio por Thiobacillus ferrooxidans. Tese (Doutorado) - Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 1989.

- 8 Urenha LC. Metodologia para pesquisas de lixiviação bacteriana [dissertação de mestrado]. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1991.
- 9 Silvas, F.P.C. Utilização de Hidrometalurgia e Biohidrometalurgia para Reciclagem de Placas de Circuito Impresso, p. 33. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.
- 10 Valdívia, D. N. U. Lixiviação Bacteriana de Minérios Refratários de Ouro. Tese (Doutorado) - Departamento de Engenharia Mineral. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, p. 25, 2003.
- 11 Sobral, L.G.S.; Oliveira, D.M.; Souza, C.E.G. Biohydrometallurgical processes: a practical approach. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010.
- 12 Horta, D.G. Influência da Adição da Espécie *Acidithiobacillus ferrooxidans* e de Íons Cl- na Dissolução da Calcopirita (CuFeS₂). Dissertação (Mestrado) - Instituto de Química, Universidade Estadual Paulista, p.27, 2008.
- 13 Yamane, L. H. Recuperação de metais de placas de circuito impresso de computadores obsoletos através de processo biohidrometalúrgico. 2012. 113 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.
- 14 Yamane, L.H.; Espinosa, D. C. R.; Tenório, J. A. S. Lixiviação Bacteriana de Sucata Eletrônica: Influência dos Parâmetros de Process. Tecnol. Metal. Mater. Miner., São Paulo, v. 10, n. 1, p. 50-56, jan.-mar. 2013.
- 15 Oliveira, D. M. de et al. Biolixiviação: Utilização de micro-organismos na extração de metais. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010. (Tecnologia Ambiental). Disponível em: <http://www.cetem.gov.br/publicacao/series_sta/sta-53.pdf>. Acesso em: 14 ago. 2014.
- 16 Frenay, J.; Wiertz, J.; Corneille, E.K. Contribution to the bioleaching study of complex pyritics-ores. Microbiological Effects on Metallurgical Processes. L. Has; J. Clum. Ed. AIME, p. 35-50, 1985.
- 17 Habashi, F. Hydrometallurgy. Gordon and Breach, Science Publishers Ltd. London, vol.2, Bacterial Leaching, p. 119-138, 1970.
- 18 Attia, Y.A.; El-Zeky. Bioleaching of gold pyrite tailings with adapted bactéria. Hydromet., Amsterdam, v. 22, n.3, p. 291-300, 1989.
- 19 Modak, J.M.; Natarajan, K.A. Development of special strains pf *Thiobacillus ferrooxidans* for enhanced bioelaching of sulphide minerals. In: Biohydromet. Proesses., Chile, v.1, p. 33-46, 1995.
- 20 Brandl, H., Bosshard, R., Wegmann, M., 2001. Computer-munching microbes: metal leaching from electronic scrap by bacteria and fungi. Hydrometallurgy 59, 319–326.