



Tratamento de lixiviado de aterro sanitário empregando integração dos sistemas coagulação/flocação e processo foto-eletro-Fenton

**Daiana Seibert¹, Alexandre Luiz Schäffer¹, Carlos Justen¹, Natan Kasper¹,
Jonas Jean Inticher²**

¹Universidade Federal da Fronteira Sul campus Cerro Largo/RS. Programa de Pós-Graduação em Ambiente e Tecnologias Sustentáveis (daiaseibert@hotmail.com;

alexandreluiz1992@hotmail.com; carlos23justen@hotmail.com; natank420@gmail.com).

²Universidade Federal da Fronteira Sul campus Cerro Largo/RS. Acadêmico de Engenharia Ambiental e Sanitária (jonas.inticher@hotmail.com).

Resumo

O presente estudo tem como objetivo investigar o tratamento de lixiviado de aterro sanitário a partir de uma integração de sistemas, envolvendo coagulação/flocação (CF) como pré e pós tratamento e processos Eletroquímicos de Oxidação Avançada. Empregou-se o sistema Foto-Eletro-Fenton (FEF) em um foto-reactor de escala laboratorial. Como variáveis respostas foram selecionados os parâmetros de degradação de compostos aromáticos (CA_{254nm}) e Cor (mg Pt-Co L⁻¹). Realizou-se uma análise dos custos diretos, avaliando a viabilidade econômica da integração dos sistemas. Para a determinação das condições otimizadas do processo de CF em *Jar-Test*, foram utilizadas as seguintes concentrações de Sulfato de Alumínio: 1 g L⁻¹, 1,6 g L⁻¹, 2 g L⁻¹, 3 g L⁻¹, 5 g L⁻¹, 8 g L⁻¹. Diferentes condições operacionais para o processo de FEF foram estudadas. Com o foto-reactor operando nas condições otimizadas verificou-se a remoção de 85% e 93% de CA_{254nm} e Cor, respectivamente, com custos de R\$138,75/m³ de lixiviado tratado.

Palavras-chave: Tratamento de Águas Residuárias. Lixiviado de Aterro Sanitário. Integração de Processos.

Área Temática: Águas Residuárias

Landfill leachate treatment employing integration of systems coagulation/flocculation and photo-electro-Fenton

Abstract

The present study aims to investigate the treatment of landfill leachate from an integration of systems, involving coagulatio / flocculation (CF) as pre and post treatment and Electrochemical processes of Advanced Oxidation. The Photo-Electro-Fenton system (FEF) was used in a laboratory scale photo-reactor. As response variables were selected the parameters of degradation of aromatic compounds (CA254nm) and Cor (mg Pt-Co L-1). An analysis of the direct costs was carried out, evaluating the economic viability of the integration of the systems. For the determination of the optimized conditions of the CF process in Jar-Test, the following concentrations of Aluminum Sulphate were used: 1 g L-1, 1.6 g L-1, 2 g L-1, 3 g L-1, 5 g L-1, 8 g L-1. Different operating conditions for the FEF process were studied. With the photo-reactor operating under optimized conditions, the removal of 85% and 93% of CA254nm and Cor, respectively, with costs of R \$ 138.75 / m³ of treated leachate was verified.



6º Congresso Internacional de Tecnologias para o Meio Ambiente

Bento Gonçalves – RS, Brasil, 10 a 12 de Abril de 2018.

Key words: *Wastewater Treatment. Sanitary Landfill Leachate. Process Integration.*

Theme Area: *Wastewater*

1 Introdução

Os lixiviados de aterro sanitário apresentam elevada toxicidade e representam uma permanente fonte de poluição ambiental. Portanto, eficientes tratamentos aplicados aos lixiviados são necessários, com a consequente redução das concentrações das substâncias perigosas presentes, antes da disposição final em corpos d'água receptores.

Pesquisas trouxeram como resultados e propostas de tratamento métodos convencionais como *air stripping*, coagulação, floculação e adensamento de lodo. Contudo, seus elevados custos, além da necessidade de adição de produtos químicos, dificultam sua aplicação (WISZNIOWSKI et al. 2006).

Os lixiviados de aterro sanitário apresentam elevada variação em sua composição e grande quantidade de substâncias tóxicas, aliada à presença de matéria orgânica refratária, o que induz a pesquisas com a finalidade de obtenção de propostas alternativas ao seu tratamento.

A oxidação da matéria orgânica em um processo de FEF ocorre através de uma oxidação eletroquímica indireta através de radicais hidroxila, gerados pela reação Fenton. Neste processo tanto o H_2O_2 como o Fe^{2+} podem ser eletro-gerados *in situ* (DENG & ENGLEHARDT, 2006).

A coagulação é o processo onde ocorre a desestabilização ou redução das partículas de carga negativa, enquanto o coagulante é o elemento usado para realizar a coagulação. A floculação é aplicada no processo de colisão e, tem como função formar partículas de tamanho maior, cuja facilidade de remoção por técnicas simples como sedimentação ou filtração é maior (TRAN et al. 2012). A floculação pode ser obtida mediante fornecimento de gradiente de velocidade que auxilia as partículas a se unirem entre elas de modo a formar partículas maiores (TCHOBANOGLOUS et al. 2013).

Neste contexto, o presente trabalho tem por objetivo investigar o tratamento de lixiviado de aterro sanitário a partir de uma integração de sistemas, envolvendo oxidação química através do processo FEF e CF, bem como análise de custos dos sistemas. As cinéticas realizadas com integração de processos foram realizadas a partir de condições operacionais otimizadas, visando investigar a viabilidade de integração dos processos estudados.

2 Materiais e Métodos

2.1 Amostras, Reagentes e Solventes

Utilizou-se o lixiviado de uma Central Regional de Tratamento de Resíduos Sólidos Urbanos do município de Giruá, localizado na porção noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, coletado e acondicionado conforme Standard Methods (APHA, 2005). Todos os reagentes e soluções utilizadas neste estudo apresentaram pureza de grau analítico. Utilizou-se do sistema Millipore® (Nova Instruments, NI 2007) para produzir a água destilada. Quando necessário, utilizou-se Ácido sulfúrico (Vetec, 1,5 M) para ajuste do pH. Para reagentes Fenton, foram utilizados Peróxido de Hidrogênio (H_2O_2) (ALPHATEC, 35% v/v, 1.10 g cm^{-3}) e Sulfato de $Fe(II)$ hepta-hidratado ($FeSO_4 \cdot 7H_2O$, Vetec) e como coagulante foi empregado Sulfato de Alumínio.

2.2 Determinações Analíticas

Para a determinação da DBO_5 , DQO e cor, utilizou-se metodologia Satandard Methods (APHA, 2005). O Carbono Orgânico Dissolvido (COD) e Nitrogênio Total foram determinados utilizando um analisador de carbono orgânico total (Shimadzu, modelo TOC-VCPh). O pH e



6º Congresso Internacional de Tecnologias para o Meio Ambiente

Bento Gonçalves – RS, Brasil, 10 a 12 de Abril de 2018.

a temperatura das soluções foram aferidas utilizando um pHgâmetro (HANNA, HI 3221). A absorvância dos CA_{254nm} foram avaliados utilizando um espectrofômetro UV-Vis (Thermo-Scientific, Evolution 201). Todas as amostras foram previamente centrifugadas a 3000 rpm durante 3 min (CELM, LS-3 Plus), exceto para as determinações dos sólidos, DQO e DBO₅.

2.3 Coagulação-Flocação (CF) e Foto-Eletro-Fenton (FEF)

Para a análise experimental da CF utilizou-se de um equipamento *Jar-Test* (PoliControl, Floc Control) e para o FEF, empregou-se um foto-reactor, ambos instalados no Laboratório de Efluentes da UFFS/Campus de Cerro Largo-RS. O foto-reactor consiste em uma caixa de MDF com revestimento interno em aço inox de dimensões 54cm x42cm x 62 cm, equipado com duas lâmpadas de Hg (Philips 13 W) como fonte simulada de radiação (UV-C). Para uma boa homogeneização da solução utilizou-se de um recipiente de borosilicato (1 L) com um agitador magnético (Centauro, modelo CAMA - 15). Dentro do recipiente foram dispostos eletrodos de ferro fundido (ânodo e cátodo) com 4 placas de dimensões 11,9cm x 7,0cm x 0,2cm, com uma distância entre placas de 2,0 cm e uma área efetiva de 152,22 cm², sendo conectados em uma fonte de corrente contínua (BK PRECISION /1687B (20 V/10 A). Ainda, para o monitoramento e controle do pH utilizou-se de um pHgâmetro (HANNA, HI 3221).

2.4 Procedimento Experimental Coagulação-Flocação

Para a CF realizaram-se as seguintes etapas: i) o pH inicial foi ajustado para 5; ii) o LAS (1,0 L) foi submetido ao *Jar Test*, adotando as seguintes concentrações: 1 g L⁻¹, 1,6 g L⁻¹, 2 g L⁻¹, 3 g L⁻¹, 5 g L⁻¹, 8 g L⁻¹ de Sulfato de Alumínio, tempo de mistura rápida (TMR) de 8 minutos em gradiente de velocidade rápida (GVR) de 300 rpm com um posterior tempo de mistura lenta (TML) de 40 minutos e gradiente de velocidade lenta (GVL) de 40 rpm. Após o procedimento as alíquotas foram centrifugadas (LS-3 Plus/CELM - 3000 rpm/120s) e foram determinadas os CA_{254nm} e a cor (mg PtCo L⁻¹).

2.5 Procedimento Experimental Foto-Eletro-Fenton (FEF)

Para a realização dos ensaios experimentais do FEF foi adicionado 1000 mL do LAS bruto, ajustado o pH para aproximadamente 4, adicionados os íons catalíticos de Ferro (Fe²⁺). Acoplou-se a um bêquer de capacidade de 1 L os eletrodos de ferro fundido (ânodo e cátodo), sendo estes conectados a uma fonte com intensidade de corrente fixa de 2,3 A. Utilizaram-se doses de 591,04; 9000 e 17408,96 mg H₂O₂ L⁻¹, que foram adicionados no mesmo momento em que as lâmpadas e a fonte foram acionados, sendo adicionado ainda, oxigênio aspergido à solução. Para a retirada de alíquotas amostrais, utilizou-se dos seguintes tempos de eletrólise: 0, 5, 15, 30, 45, 60, 90 e 120 minutos. Após retirada a alíquota amostral, a mesma foi submetida a centrifugação (LS-3 Plus/CELM - 3000 rpm/120s), e foram determinadas os CA_{254nm} e a cor (mg PtCo L⁻¹). Por fim, para evitar a passivação dos eletrodos, a cada 30 minutos, inverteu-se a polaridade dos terminais de alimentação da fonte de corrente contínua.

3 Resultados e Discussão



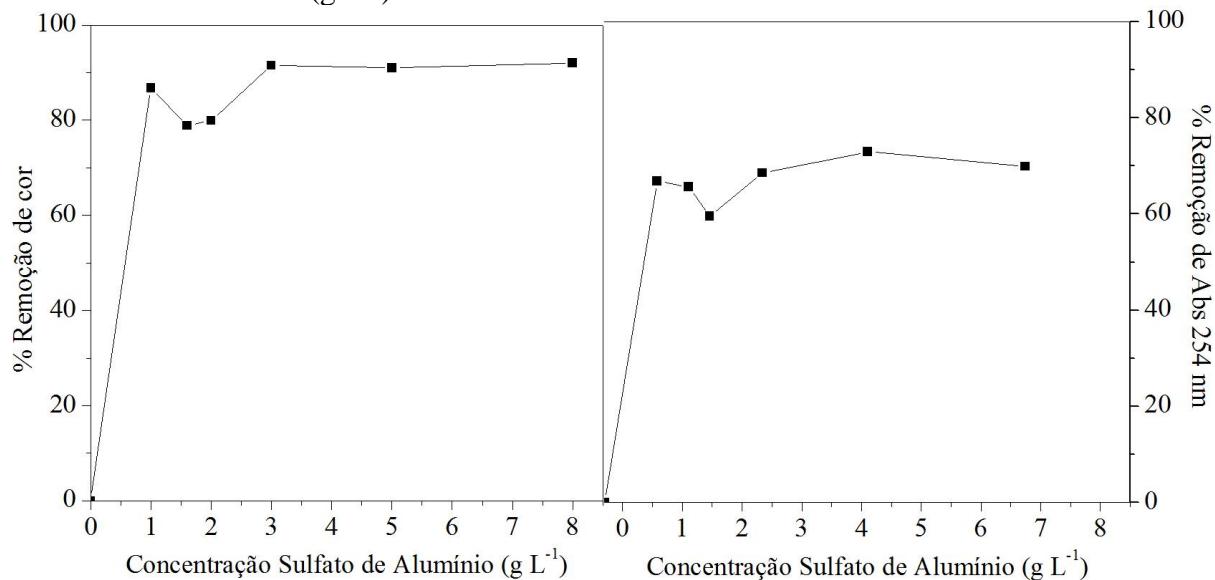
3.1 Caracterização do LAS

O LAS é caracterizado por apresentar elevada turbidez e coloração (203 mg PtCo L⁻¹, dil. 1:25), altos valores de Demanda Química de Oxigênio (DQO=2350 mg O₂ L⁻¹) e Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO₅= 420 mg O₂ L⁻¹), Carbono Orgânico Dissolvido (COD= 774 mg C L⁻¹) e Nitrogênio Total Dissolvido (NTD=427). Além de apresentar pH levemente alcalino associado a compostos inorgânicos (pH=7,86).

3.2 Estudo da concentração de coagulante

Testes experimentais foram realizados empregando diferentes concentrações de coagulante. A Figura 1 mostra a porcentagem de remoção dos CA_{254nm} e da cor (mg PtCo L⁻¹) em função da concentração de coagulante Sulfato de Alumínio (g L⁻¹).

Figura 1 - Porcentagem de remoção de CA_{254nm} e cor (mg PtCo L⁻¹) em função da concentração de Sulfato de Alumínio (g L⁻¹)



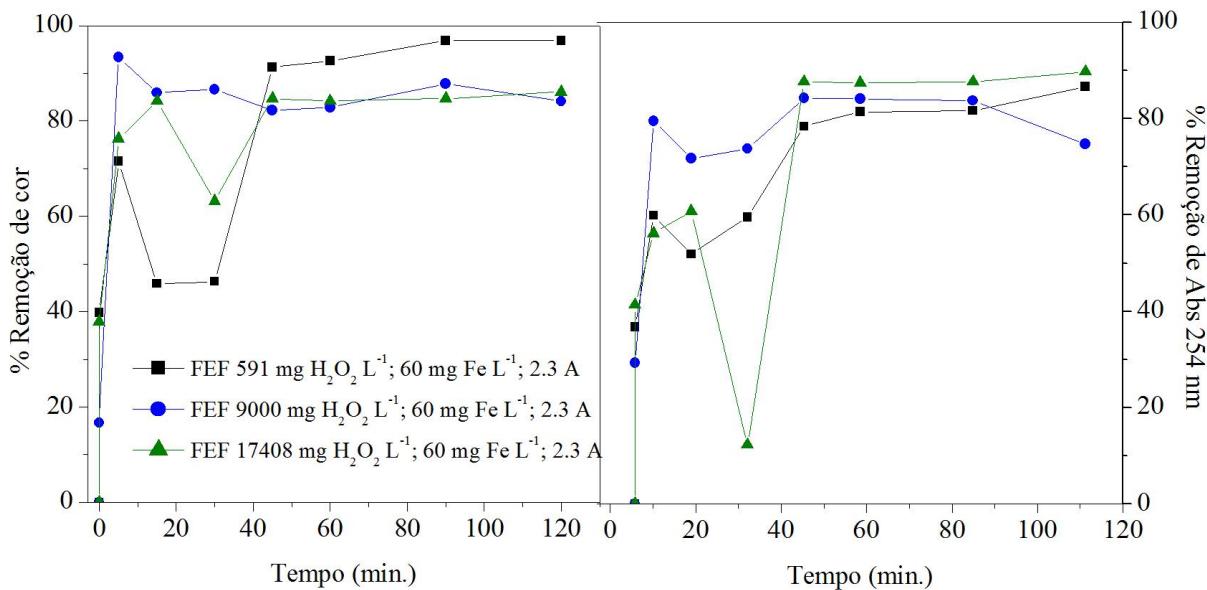
Fonte: elaborado pelo autor, 2017.

As maiores concentrações de coagulante possibilitaram a maior remoção de cor e Abs 254 nm. No entanto, por questões de eficiência de remoção, a concentração de 3 g Al₂(SO₄)₃ L⁻¹ foi selecionada como adequada. Tal concentração proporcionou redução de aproximadamente 69% de redução dos CA_{254nm} e 92% de cor.

3.3 Estudo das condições operacionais da reação de Foto-Eletro-Fenton (FEF)

A Figura 2 apresenta os testes experimentais realizados empregando diferentes concentrações de H₂O₂ em condições operacionais de 60 mg Fe L⁻¹ e 2,3 A.

Figura 2 - Porcentagem de redução de CA_{254 nm} e cor em função do tempo na reação FEF



Fonte: elaborado pelo autor, 2017.

Comportamentos semelhantes foram observados em diferentes concentrações de H_2O_2 alcançando resultados de remoção em menores tempos de reação, proporcionando assim 80% de redução de $\text{CA}_{254\text{nm}}$ e 93% de redução da cor em tempo de reação de 15 minutos. H_2O_2 pode ser considerado a principal fonte de radicais hidroxila nos processos de oxidação avançada, sendo assim baixas concentrações de H_2O_2 não irão gerar radicais suficientes para proporcionar relativos decréscimos da matéria orgânica. Contudo a efetividade também decresce quando a dosagem é aumentada até certo ponto. Neste caso pode ocorrer um efeito de “sequestro” de radicais hidroxila, resultando na recombinação destes radicais, o que por sua vez também diminui a efetividade do processo (NIDHEESH & GANDHIMATHI, 2012; UMAR et al., 2010; ZHANG, H. et al., 2014).

Considerando que favoráveis reduções foram alcançadas em 15 minutos de reação, optou-se por selecionar esta condição como adequada, visto que maiores tempos de eletrólise demandam de maior consumo de energia, o que vem a onerar os custos do processo de tratamento. Sendo assim, a condição de tratamento FEF utilizada na integração com CF foi de 9000 mg $\text{H}_2\text{O}_2 \text{ L}^{-1}$; 60 mg Fe L^{-1} ; 2.3 A, proporcionando remoções de $\text{CA}_{254\text{nm}}$ (80%) e cor (93%).

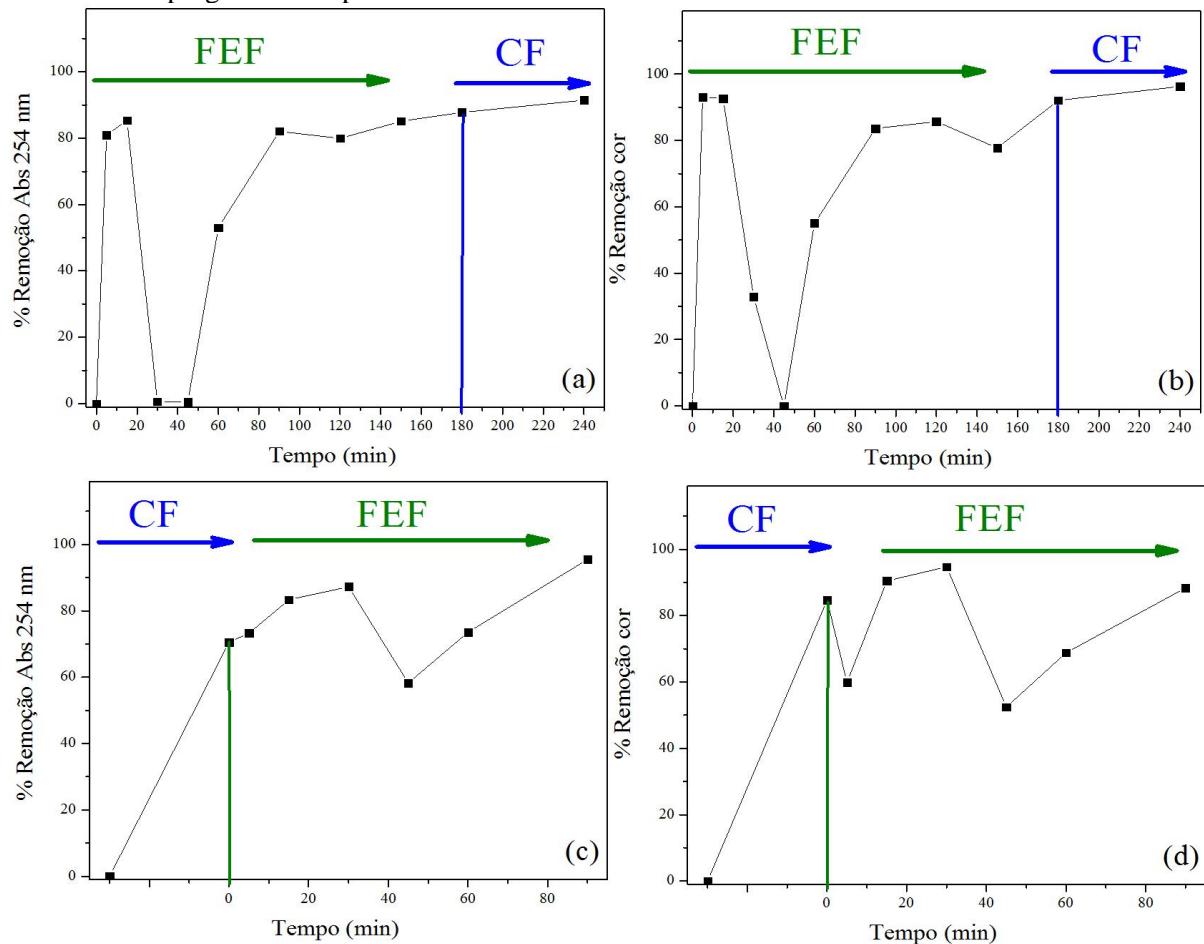
3.4 Estudo da integração de processos

Baseado nos testes preliminares realizados, as melhores condições operacionais para a reação FEF e a melhor concentração de Sulfato de Alumínio foram aplicadas em cinéticas onde estudou-se a integração dos sistemas. A Figura 3 apresenta os sistemas de integração investigados.

Figura 3 - Porcentagem de remoção: (a) $\text{CA}_{254\text{nm}}$ e (b) cor para integração onde o processo de oxidação química foi empregado como pré-tratamento e a coagulação como polimento e (c) $\text{CA}_{254\text{nm}}$ e (d) cor



para o sistema integrado onde o processo de coagulação foi utilizado como pré-tratamento e o processo de FEF foi empregado como polimento



Fonte: elaborado pelo autor, 2017.

Conforme apresentado em (a) e (b), em tempo de 30 minutos para o processo FEF percebe-se decréscimo da eficiência de remoção de cor e CA_{254nm} o que pode ser atribuído a inversão de polaridade realizada após este período de tempo, considerando que o biofilme formado sob os eletrodos desprende-se estando estes compostos em solução e posteriormente vindo a complexar/precipitar novamente. No entanto, quando o processo FEF é empregado como pré-tratamento, 93 % de remoção de cor e 85 % de redução dos CA_{254nm} são alcançadas em 15 minutos de reação, sendo que o processo de CF empregado como pós tratamento aumentou a eficiência do sistema em apenas 3% para cor e 6% para CA_{254nm}.

Quando o processo de CF foi investigado como pré-tratamento possibilitou-se remoção de 84% de cor e 70% de CA_{254nm}, sendo que o processo de FEF proporcionou eficiência adicional de 4% para redução de cor e 25% para remoção de CA_{254nm}.

Contudo, analisando a eficiência individual do Processo Foto-Eletro-Fenton em (a) e (b), os resultados apresentados não justificam a integração da coagulação/flocação como tratamento complementar nas condições propostas. Visto que cinéticas favoráveis são alcançadas em menor tempo de reação, e a integração de sistemas não proporcionou grande adição de eficiência.

3.5 Análise de custos



6º Congresso Internacional de Tecnologias para o Meio Ambiente

Bento Gonçalves – RS, Brasil, 10 a 12 de Abril de 2018.

De acordo com a metodologia proposta por Modenes et al. (2012) calcularam-se os custos diretos do processo CF e FEF. Adotou-se preços praticados pelo mercado nacional de energia elétrica industrial ($R\$0,50\text{ kw h}^{-1}$) e os reagentes Ferro ($R\$9,00\text{ kg}^{-1}$), Sulfato de Alumínio ($R\$6,76\text{ kg}^{-1}$), H_2O_2 ($R\$5,38\text{ L}^{-1}$) e Ácido Sulfúrico ($R\$75,50\text{ L}^{-1}$). Após a otimização do processo CF, os custos diretos resultaram em $R\$ 37,83/\text{m}^3$ de efluente tratado, em comparação ao processo FEF, com um custo total de $R\$ 138,75/\text{m}^3$ de efluente tratado. Integrando-se os processos, obteve-se um custo total aproximado de $R\$ 176,58/\text{m}^3$. Apesar do processo FEF apresentar valores de tratamento mais elevados, este proporciona maiores taxas de oxidação, podendo assim, ser aplicado isoladamente.

4 Considerações finais

Avaliando de forma sistêmica (eficiência de remoção, economicidade) os resultados apresentados no processo de CF empregando as diferentes concentrações de coagulante mostraram que a concentração de 3 g L^{-1} se apresentou como a mais eficiente, dado que as concentrações de 5 e 8 g L^{-1} não representaram aumento substancial na remoção, além de resultar em maior custo. Quanto ao processo de FEF, a condição ótima de tratamento para estas condições foi de $9000\text{ mg H}_2\text{O}_2\text{ L}^{-1}$; 60 mg Fe L^{-1} , com a obtenção de 93% de redução da cor e 85% de redução da $\text{CA}_{254\text{nm}}$ em um tempo de 15 minutos. Ao avaliar-se os resultados da integração FEF e CF ou CF e FEF observa-se que para as condições propostas não se justifica a integração de processos, dado que o FEF individual apresentou resultados próximos à integração proposta em menores tempo de detenção. Portanto, a integração, neste caso, iria resultar em custos, tempo e outros fatores adicionais desnecessários.

5 Referências

- APHA, Standard Methods for Examination of Water and Wastewater, 21st ed., **American Public Health Association**, Washington DC, 2005.
- DENG, Y.; ENGLEHARDT, J. D. - Treatment of landfill leachate by the Fenton process. **Water Research**, v. 40, p. 3683-3694, 2006.
- MÓDENES, A. N; ESPINOZA-QUIÑONES, F. R; BORBA, F. H; MANENTI, D. R. Performance evaluation of an integrated photo-Fenton – Electrocoagulation process applied to pollutant removal from tannery effluent in batch system. **Chemical Engineering Journal**, v. 197, p 1-9, 2012.
- NIDHEESH, P. V.; GANDHIMATHI, R. Trends in electro-Fenton process for water and wastewater treatment: An overview. **Desalination**, v. 299, p. 1–15, ago. 2012.
- TCHOBANOGLOUS, G., BURTON, F.L., METCALF, E., STENSEL, H.D. **Wastewater Engineering: Treatment and Reuse**. McGraw-Hill, 2003.
- TRAN, N., DROGUI, P., BLAIS, J.-F., MERCIER, G. Phosphorus removal from spiked municipal wastewater using either electrochemical coagulation or chemical coagulation as tertiary treatment. **Sep. Purif. Technol**, v. 95, 16-25, 2012.
- UMAR, M.; AZIZ, H. A.; YUSOFF, M. S. Trends in the use of Fenton, electro-Fenton and photo-Fenton for the treatment of landfill leachate. **Waste Management**, v. 30, n. 11, p. 2113–2121, 2010.



6º Congresso Internacional de Tecnologias para o Meio Ambiente

Bento Gonçalves – RS, Brasil, 10 a 12 de Abril de 2018.

WISZNIOWSKI, J.; ROBERT, D.; SURMACZ-GORSKA, J.; MIKSCH, K; WEBER, J. V. Landfill leachate treatment methods: a review. **Chemical Engineering Journal**, v. 4, 51-61, 2006.

ZHANG, H. et al. Removal of COD from landfill leachate by an electro/Fe²⁺/peroxydisulfate process. **Chemical Engineering Journal**, v. 250, p. 76–82, 2014.