

**Avaliação e mitigação de resíduos líquidos
dos processos de eletrodeposição do
cobre e cromo na indústria de cilindros
de rotogravura usando eletrocoagulação-
Flotação de alta eficiência**



RESUMO

PEDRO DE ARAÚJO

Com intuito de salvar metais, água, energia elétrica e minimizar a geração de resíduos sólidos, recursos naturais de relevante valor ambiental, este trabalho apresenta técnica para tratamento eletrolítico de resíduos líquidos. Foi construído um reator de eletrocoagulação-flotação de alta eficiência (ECOFAE), em escala piloto de bancada, onde promovida por fonte de corrente contínua durante eletrólise há geração in situ de íons metálicos que formarão moléculas em reações de eletrocoagulação, eletrofloculação e eletroflotação, proporcionando ganhos em relação aos métodos tradicionais de reações físico-químicas (RFQ) utilizadas nos sistemas de tratamento de águas residuárias (STAR) para mitigação de resíduos líquidos. O resíduo líquido estudado foi gerado na eletrodeposição de revestimentos de cobre e cromo para fabricação dos cilindros de rotogravura, de indústria cuja atividade é utilizadora de grande quantidade de água e metais em sua operacionalização. Cobre (II) [173,19mg L⁻¹] e cromo (VI) [280,79mg L⁻¹] tiveram 99,99% de remoção do resíduo líquido tratado no reator ECOFAE, entretanto para este tipo de composição química contendo diversidade iônica não existe uma tecnologia capaz de isoladamente remover todos os seus contaminantes sem combinação com outra tecnologia de mitigação. Resultados obtidos foram usados para dimensionar o reator ECOFAE para implantação na empresa estudada (EE), demonstram alternativas existentes para mitigação de resíduos líquidos das empresas potencialmente poluidoras dos ramos: galvanoplastia, circuito impresso, rotogravura, mineração e correlatas para salvarem recursos naturais e agir para a sustentabilidade do planeta, ação não mais possível de ser adiada diante do atual cenário mundial de insustentabilidade estabelecida por excessiva ação antrópica negativa.

— Introdução

Este trabalho demonstra o funcionamento de um reator ECOFAE, construído para operar em escala piloto de bancada, onde promovida por fonte de energia elétrica durante eletrólise há geração in situ de íons metálicos que formarão moléculas em reações de coagulação, floculação e flotação proporcionando ganhos em relação aos métodos tradicionais de RFQ utilizados em maior escala e destilação à vácuo (VD) de uso em menor escala, para mitigação de resíduos líquidos nos STAR's de empresas do ramo e correlatas citadas.

Neste trabalho há breve revisão histórica do desenvolvimento da técnica para tratamento eletrolítico de resíduos líquidos, resultados práticos obtidos no reator eletrolítico construído em escala piloto de bancada, para remoção de cobre(II) [173,19mg L⁻¹] e cromo(VI) [280,79mg L⁻¹], constituintes de uma alíquota de 4 litros retirada de um volume de 1000 litros de resíduo líquido previamente coletado, caracterizado em laboratório externo, armazenado e que é representativo da operacionalização da planta industrial de processo galvânico da EE, essa alíquota estudada

a partir de agora será denominada efluente problema (EP) com a qual se realizou o ensaio simulando conforme descrito por Araújo e Katz (2009), as condições do reator ECOFAE piloto em escala industrial implantado em 2009 na Termogal, Itu-SP.

Determinadas as melhores condições para a realização do ensaio, eletrólise do EP usando o reator ECOFAE piloto em bancada, após a execução do tratamento com ECOFAE, o efluente resultante foi filtrado para separação física das fases sólida e líquida, que denominaremos daqui para frente: a “fase líquida do EP tratado por ECOFAE e posteriormente filtrada” (FL) e a “fase sólida retida no filtro após o tratamento do EP com ECOFAE” (FS). A seguir ambas as fases foram remetidas a laboratório externo, FL e FS, objeto de caracterização idêntica ao EP para a FL conforme item 3.1.2 adiante e para FS caracterização apenas dos metais alumínio, cálcio, cobre total, cromo total, ferro total, magnésio, níquel, zinco, sódio, potássio, bário e chumbo, demonstradas neste trabalho. Como metas atingidas com uso do reator ECOFAE observou-se a significativa redução dos custos operacionais, melhoria na eficiência do tratamento, produção de água de reuso e minimização da massa de resíduos sólidos final a mitigar legalmente em sistemas de fornecedores terceiros.

Na operacionalização dos processos da EE utilizam-se grande quantidade de água e substâncias químicas cujos metais resultam alto impacto ambiental e degradação do solo e água se lançados in natura, consequentemente causando sérios danos ambientais se ocorrer atividade antrópica negativa sem a devida mitigação de seus resíduos.

Salvar recursos naturais com uso da tecnologia ECOFAE, mitigar resíduos líquidos de processos industriais potencialmente poluidores, dentre eles metais, água, energia elétrica e minimizar a geração de resíduos sólidos, recursos naturais de relevante valor ambiental contribuem para que os processos industriais da fábrica do futuro adotem novo paradigma de operacionalização focado na vida sustentável para garantir a existência de um planeta mais limpo (P+L).

2. ELETROCOAGULAÇÃO-FLOTAÇÃO NO TRATAMENTO DE RESÍDUOS LÍQUIDOS

“A primeira notícia que se tem a respeito do processo eletrolítico data de 1870, quando C.V. Kirkham propôs um processo de filtração de esgotos, sugerindo que antes dos filtros, o líquido deveria passar por uma câmara contendo placas de cobre e zinco, onde a passagem de uma corrente contínua ajudaria o esgoto a libertar-se de suas propriedades nocivas ” (CETESB, 1988).

Na literatura do século XIX destacam-se a patente Hermite (1887), e informações sobre projetos instalados na França e Inglaterra na década de 1890 de tratamento do esgoto doméstico com adição de água marinha para, além de remover sólidos contaminantes realizar a desinfecção bacteriana do efluente devido à presença do cloro (ANGELIS; BIODIA; CORSO; et al,1988).

No Brasil é necessário citar o Engenheiro Saturnino de Brito, “pioneiro da Engenharia Sanitária e Ambiental” que em 1909 apresentou no IV Congresso Médico Latino Americano o processo eletrolítico do inglês Willian Webster (WIENDL,1998), e a referida patente Webster, (1889).

Alguns anos depois, em 1911 foi instalado um reator eletrolítico para tratar o esgoto doméstico em Santa Mônica na Califórnia, EUA, que mais tarde em 1930 deixou de funcionar (FERREIRA, 2010).

No Brasil várias tentativas de implantação de reatores eletrolíticos ocorreram a partir da década de 1970, o primeiro reator brasileiro em escala comercial foi instalado no ano de 1985 pela Companhia Espirito Santense de Saneamento CESAN (Barra do Jacu, ES) para tratamento de água de um poço profundo com finalidade de potabilidade (FERREIRA, 2010). Um tratado sobre processos eletrolíticos aplicados na mitigação de esgotos sanitários de autoria de Wiendl (1998), além de percorrer

a teoria eletroquímica descreve casos de sucesso e abandono ocorridos em todo o mundo, constituindo-se numa obra de referência para novos desenvolvimentos de reatores eletrolíticos. O autor relata em sua publicação mais de uma dezena de projetos implantados nas cidades brasileiras, a maioria no estado de São Paulo em parceria com a Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP e Companhia Ambiental do Estado de São Paulo - CETESB.

Os pesquisadores Crespilho e Rezende (2004), publicaram em um livro técnico resultados de importante trabalho feito com diversos resíduos líquidos industriais que reúne ampla base teórica e resultados práticos sobre eletrofloação.

Ferreira (2010), publicou um livro técnico bastante didático que apresenta as bases teóricas da eletrofloação e este pode ser usado nos currículos de várias graduações e cursos técnicos, útil para os novos e futuros pesquisadores.

Estendendo a busca literária sobre o tema com foco em patentes e novas pesquisas publicadas teremos a percepção de que a eletrocoagulação, eletrofloação e eletrofloculação constituem-se temas recorrentes há mais de um século. No cenário mundial o tema retorna a pauta necessária para sustentabilidade do planeta. Uma variedade de tipos de reatores fora testada e patenteada e há enorme campo para a pesquisa e o desenvolvimento de novos reatores eletrolíticos para mitigação dos resíduos líquidos de quaisquer origens.

A inspiração para o desenvolvimento do reator ECOFAE nasceu neste autor em 2008 quando encontrou a patente Hermite e a partir dela desenvolveu e construiu em tanque fechado um reator de eletrocoagulação-floação de alta eficiência para operar em regime

de fluxo contínuo dimensionado para escala piloto industrial que foi instalado numa planta galvânica de pequeno porte, na empresa Termogal - Itu-SP, utilizando anodos tubulares de ferro e inox 304, iniciando os testes com corrente pulsante de onda quadrada (ARAUJO; KATZ, 2009).

Recentemente na Grécia, Dermentzis, Christoforidis e Valsamidou (2010), realizaram e publicaram importante trabalho desenvolvido com amostras de efluentes sintéticos e industriais cujos teores metálicos de cobre (II) e cromo (VI), dentre outros metais, foram experimentalmente variados tendo concentrações próximas deste estudo, entretanto usaram somente eletrodos de alumínio nos experimentos, resultando em sucesso.

Beyazit (2014), na Turquia, realizou experimentos com efluente industrial contendo concentrações baixas de cobre (II) e cromo (VI) e alta concentração de níquel (II), variando-se os materiais dos pares de eletrodos, combinando aço inox 304, ferro e alumínio, exceto combinação de todos, produzindo bons resultados e parâmetros interessantes na aplicação.

2.1 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA PARA O FUNCIONAMENTO DO REATOR ECOFAE

A seguir estão descritas as principais leis da física e da química que regem o funcionamento do reator ECOFAE.

2.1.1 LEIS DE OHM

No século XIX, na cidade de Colônia, Alemanha, no ano de 1827 o físico e matemático Georg Simon Ohm publicou resultados de seu trabalho dando conta de que a corrente elétrica que atravessa um fio condutor é proporcional à diferença de potencial aplicada à área da seção transversal do fio e inversamente proporcional ao comprimento. A primeira lei de Ohm trata da proporcionalidade entre corrente elétrica **I** (amperes) e a diferença de potencial **V** (volts) que há entre materiais condutores, também chamados condutores ôhmicos quando à temperatura constante essa lei for verdadeira. A razão **V / I** determina a tensão necessária a ser aplicada para passar uma dada corrente em um dispositivo de circuito elétrico. Quanto maior for a dificuldade que o dispositivo impõe a passagem da corrente, maior deve ser a tensão aplicada para estabelecer um certo valor de corrente. A razão **V/I** resulta dificuldade imposta pelo dispositivo à passagem da corrente elétrica e por isso é denominada de resistência elétrica **R** (Ohm ou Ω). A 1ª lei de Ohm é expressa pela equação (1) **V = R . I**

A 2ª lei de Ohm mostra que a resistência elétrica é proporcional ao comprimento do condutor **ℓ** (m) e inversamente proporcional a área da seção transversal **A** (m²), e o coeficiente de proporcionalidade é conhecido como resistividade elétrica ρ (ohm-metro ou Ω m) expressa pela equação (2): $\rho = (R \cdot A) / \ell$ (IFSC, 2015). Logo, para determinar a tensão entre dois eletrodos na eletrólise usa-se a equação (3): **V= (I . ρ . ℓ) / A** ; considerar **ℓ** a distância entre eletrodos.

2.1.2 ELETRÓLISE

Eletrólise é um fenômeno físico químico não espontâneo que ocorre em soluções químicas, eletrólitos, onde há anodo e cátodo imersos no meio e conectados através de um circuito elétrico. A energia elétrica é a força motriz para que ocorram reações químicas onde há cessão de elétrons para cátions e doação de elétrons para ânions (FELTRE; SETSUO, 1974). A descoberta de fenômenos bioelétricos, culminaram com a descoberta da pilha no final do século XVIII, após disputa entre o físico italiano Alessandro Giuseppe Antonio Anastasio Volta com o médico e físico Luigi Galvani, resultou na criação da primeira pilha em 1800, por Volta (BERTORELLE, 1974).

William Nicholson físico inglês e Anthony Carlisle em 1800 na Inglaterra foram os primeiros cientistas a registrar os resultados do experimento com eletrólise da água observando a liberação de oxigênio e hidrogênio nos eletrodos. A partir de então o termo eletrólise passou a ser usado e a ciência da eletroquímica se desenvolveu (ZOULIAS; VARKARAKI; LYMBEROPOULOS; et al, 2015).

2.1.3 LEIS DE FARADAY

No contexto histórico do desenvolvimento científico, Michael Faraday (1833-1834) foi o primeiro cientista a estabelecer as leis que regulam a eletrólise, um fenômeno físico-químico não espontâneo, conhecidas como 1ª e 2ª Leis de Faraday (BERTORELLE, 1974). Experimentos eletroquímicos foram realizados em cela eletrolítica, que consistiu de dois eletrodos conectados através de um circuito elétrico, imersos em uma solução química (eletrólito) capaz de conduzir eletricidade. Os eletrodos são condutores elétricos ligados a uma fonte elétrica que promove a passagem de corrente elétrica através do eletrólito. Faraday descobriu que ao circular uma carga, quantidade de eletricidade pelo eletrólito ocorre descarga de uma massa de íons nos eletrodos sendo chamado de anodo o polo positivo e cátodo o polo negativo do circuito eletroquímico (GERISCHER, 1996).

A 1ª Lei de Faraday estabeleceu que a massa de substância libertada nos eletrodos na eletrólise é diretamente proporcional a carga

que passa através do eletrólito e é completamente independente de outros fatores, expressa pela equação (4) $M = K \cdot Q$ onde M é a quantidade em gramas de substância depositada; K é o coeficiente de proporcionalidade chamado equivalente eletroquímico da substância; Q é a quantidade de eletricidade ou carga elétrica, em coulombs, que passa pelo eletrólito. A 2ª Lei de Faraday estabeleceu que na eletrólise com diversos eletrólitos usando a mesma quantidade de eletricidade há liberação de quantidade de massas proporcionais aos equivalentes grama das substâncias E_q , expressa pela equação (5) $M = K \cdot E_q$ Disto resulta que (4+5) equação (6) $M = K \cdot Q \cdot E$. A carga de corrente elétrica pode ser expressa pela equação (7) $Q = i \cdot t$, onde i é a intensidade de corrente elétrica em amperes e t é o tempo em segundos (GLINKA, 1970). Coulomb C , é a carga elétrica, a quantidade de eletricidade transportada em 1 segundo por uma corrente de 1 ampere (INMETRO, 2012).

A constante de Faraday F foi verificada experimentalmente (FELTRE; SETSUO, 1974), sendo expressa pela equação (8) atualizada $F = 1 / 96485,3251 \text{ C}90 \text{ mol}^{-1}$. O significado da constante de Faraday, F , cujo valor atualizado é $96485,3251 \text{ C}90 \text{ mol}^{-1}$ conforme Coda-ta (2014), isto é, na eletrólise carga elétrica que ao passar pelo circuito eletroquímico é o produto da constante de Avogadro N_A , $6,022 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ multiplicado pela carga elementar do elétron-volt, e , $1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$, expresso pela equação (9) $F = N_A \cdot e$. (VOGEL, 1988).

Equivalente grama E_q de uma substância ou íon é sua massa expressa em gramas e é numericamente igual ao respectivo equivalente químico do elemento, a , ou seja, o quociente do átomo-grama do elemento, A , pela sua valência z ; dado pela equação (10) $a = A / z$. Outra definição necessária para a eletrólise é o equivalente eletroquímico (α) expresso em gramas depositadas por um ampere segundo, isto é a quantidade de substância eletrolisada ou depositada, quando se faz passar uma carga de 1 Coulomb durante 1 segundo na solução, expresso pela equação (11): $\alpha = E_q / F$. Assim, podemos escrever a equação geral da eletrólise (12): $M = (1 / F) \cdot E_q \cdot i \cdot t$ ou $M = (1 / F) \cdot Q \cdot E_q$

Dessa maneira podemos definir o equivalente eletroquímico para os elementos ferro e alumínio usados neste trabalho, considerando tempo de 3600 segundos para melhor entendimento da dissolução anódica no reator ECOFAE.

Para o elemento químico ferro teremos o peso molecular 55,85 g. mol⁻¹ e considerando valência 2 podemos calcular o valor do equivalente eletroquímico: $Eq(Fe^{+2}) = (27,925 / 96485,3251) \cdot 3600 = 1,0419$ g. A⁻¹ h⁻¹ Para o alumínio, 26,98 g mol⁻¹ considerando valência 3, teremos $Eq(Al^{+3}) = (8,993 / 96485,3251) \cdot 3600 = 0,3356$ g. A⁻¹ h⁻¹.

Implicando que ambos equivalentes eletroquímicos são valores teóricos referidos a um rendimento de 100% na eletrólise. Entretanto, a eletroquímica é governada pela lei de Ohm e pelas Leis de Faraday (VOGEL, 1988). O rendimento de cada processo deve ser experimentado.

2.2 PRINCIPAIS REAÇÕES QUÍMICAS ENVOLVIDAS NO REATOR ECOFAE

Na tabela 1 a seguir, as principais reações químicas que ocorrem na eletrólise no reator ECOFAE, com cátodos de inox 304 e anodos de alumínio e ferro utilizados neste trabalho, principalmente de redução de metais, formação de hidróxidos e óxidos, liberação de gases, conforme Crespilho e Rezende (2004), para as reações de 1 a 10 e de acordo com Dermentzis, Christoforidis e Valsamidou (2010), para as reações 11 e 12:

Tabela 1 – Principais reações envolvidas durante a eletrólise com reator ECOFAE

No anodo de ferro	$Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^-$ (1)	(1)
Em meio alcalino	$Fe^{2+} + 2OH^- \rightarrow Fe(OH)_2$	(2)
Em meio ácido	$4Fe^{2+} + O_2 + 2H_2O \rightarrow 4Fe^{3+} + 4OH^-$	(3)
No anodo de alumínio	$Al \rightarrow Al^{3+} + 3e^-$	(4)
Em meio alcalino	$Al^{3+} + 3OH^- \rightarrow Al(OH)_3$	(5)
Em meio ácido	$Al^{3+} + 3H_2O \rightarrow Al(OH)_3 + 3H^+$	(6)
No catodo de inox, meio alcalino	$2H_2O + 2e^- \rightarrow H_2\uparrow + 2OH^-$	(7)
No catodo de inox, meio ácido	$2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2\uparrow$	(8)
No anodo de inox, meio alcalino	$4OH^- \rightarrow O_2\uparrow + 2H_2O + 4e^-$	(9)
No anodo de inox, meio ácido	$2H_2O \rightarrow O_2\uparrow + 4H^+ + 4e^-$	(10)
Redução do cobre	$3Cu^{2+} + nM(Fe \text{ e } Al) \rightarrow Cu + nM(Fe^{+2} \text{ e } Al^{3+})$	(11)
Redução do cromo	$Cr_2O_7^{2-} + 6e^- + 7H_2O \rightarrow 2Cr^{3+} + 14OH^-$	(12)

Nota: Reações 9 e 10 ocorrem no eletrodo de inox 304 quando há reversão de polaridade dos eletrodos.

2.3 O PROCESSO DE TRATAMENTO ELETROLÍTICO COM REATOR ECOFAE

A tecnologia ECOFAE pode ser usada para tratar efluentes com mistura de quaisquer metais pesados, complexos estáveis, óleos e graxas, tensos ativos, vírus, bactérias, fungos, resíduos orgânicos humanos (fezes e urina) e disruptores endócrinos. O reator ECOFAE usa eletrodos bidimensionais sendo os cátodos em aço inox, titânio ou construídos com materiais dimensionalmente estáveis de última geração, e os anodos de sacrifício em ferro e/ou alumínio. Sua configuração é monopolar de fluxo contínuo perpendicular formando múltiplas células eletrolíticas em seu interior, quando operacionalizado nele ocorrem os fenômenos físicos da eletrocoagulação, eletrofloculação e eletroflotação.

Na eletrocoagulação é preciso alterar a força iônica da solução para a ocorrer o fenômeno da geração *in situ* de coagulantes. Durante a eletrólise com eletrodos de ferro e alumínio estes são doadores de íons respectivos ao eletrólito pela dissolução dos anodos reativos, propiciando a desestabilização e agregação de partículas. A maioria das soluções com presença de microrganismos, partículas coloidais ou húmicas, possuem sua carga líquida negativa, por estarem na mesma polaridade não ocorrem colisões entre elas, ao adicionar os íons de alumínio ou de ferro são acrescidos ao meio espécies hidrolisadas de carga positiva, propiciando choques entre as partículas, levando a formação dos flocos (DI BERNARDO, 1993).

O fenômeno de eletrofloculação é resultante do transporte das partículas iônicas geradas pela coagulação, pode ocorrer através da sedimentação do material no fundo da célula. Com o deslocamento dos gases, gerados *in situ*, e dos elétrons não há necessidade de promover a agitação da água para provocar a colisão entre os flocos de menor dimensão, o processo possibilita a remoção das partículas coloidais menores (WIENDL, 1998).

A eletroflotação ocorre através da movimentação do gás hidrogênio e oxigênio na solução aquosa pela união das partículas suspensas aos gases removendo-as através de arraste para a superfície, formando a espuma. O

diâmetro das bolhas formadas pelos gases é menor que as provocadas nos processos de flotação por ar dissolvido onde se inserem na solução microbolhas de oxigênio, gerando menos turbulência propiciando a remoção das partículas de menor dimensão. A disposição dos eletrodos em toda a extensão da célula eletrolítica promove maior dispersão de gases por toda a solução, promovendo melhor eficiência na remoção de resíduos do meio, sem a necessidade de agregar equipamentos ou sistemas complementares (DI BERNARDO, 1993).

A corrente elétrica ideal para o uso no reator ECOFAE é do tipo contínua pulsante reversa fornecida por retificadores eletrônicos de última geração com o sistema operando automaticamente ciclos programáveis contínuos de inversão de polaridade em frequências variáveis para garantir o rendimento da eletrólise. Entretanto devido ao alto custo desse tipo de fonte de corrente DC, a maioria dos reatores em uso até o presente utilizaram corrente contínua fornecida por fonte convencional ou eletrônica chaveada e poucos projetos utilizaram inversão de polaridade através de chaves automáticas com a finalidade de evitar polarização anódica e quando necessário promover a despolarização, importante para a manutenção do rendimento da eletrólise (ARAUJO; KATZ, 2009).

A eficiência da mitigação de resíduos com a tecnologia ECOFAE pode ultrapassar 99% depende da composição do efluente e da combinação de eletrodos, atendendo com facilidade as normas legais e técnicas específicas, assim torna-se uma alternativa promissora para mitigar diferentes resíduos de diversificada origem contribuindo para um novo paradigma de vida sustentável nos dias atuais. A eficiência eletroquímica da eletrólise com reator ECOFAE depende de vários fatores, composição e condutividade da solução, pH, temperatura, configuração e materiais dos eletrodos, rendimento elétrico da fonte de corrente, tempo de reação, fluxo contínuo ou batelada. A corrente elétrica impressa entre os eletrodos determina a massa anódica corroída do ferro ou alumínio, em gramas, segundo a equação geral da eletrólise (12).

Conforme Crespilho e Rezende (2004), a potência elétrica, ou seja a energia elétrica consumida (kW h m^{-3}) de um reator de fluxo contínuo pode ser calculada pela equação (13): $P = (V \times I \times t) / Q$, onde: **P** = Potência do reator de fluxo contínuo; **V** = tensão elétrica em volts; **I**= corrente elétrica; **t** = tempo total em horas; **Q** = fluxo do influente percolado ($\text{m}^3 \text{h}^{-1}$) .

Para evitar a passivação anódica do alumínio pelo excesso de íons OH^- , o reator ECOFAE opera em ciclos variados de corrente contínua com polaridade reversa. Se for usado cátodo de alumínio pode ocorrer passivação catódica se houver excesso de íons H^+ (CRESPILHO; REZENDE, 2004).

No reator ECOFAE comercial alta área superficial dos eletrodos e a pequena distância entre eles, entre 0,01 - 0,015m permitem uso de baixa tensão elétrica e alta densidade de corrente contínua. A densidade de corrente contínua aplicada situa-se entre 100 - 500 A m^{-2} e a tensão elétrica utilizada varia de 3 - 45 V, não deve ultrapassar este limite por questão de segurança operacional. O regime de trabalho e operação nos reatores construídos por inúmeros pesquisadores pode ser em batelada ou fluxo contínuo, sendo este último o regime adotado para o reator ECOFAE comercial que permite uma construção compacta, conforme modelo construído em escala piloto industrial (ARAUJO; KATZ, 2009).

3. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

3.1 O SISTEMA PROPOSTO PARA MITIGAÇÃO ELETROLÍTICA DE COBRE E CROMO

A experiência anterior com reator ECOFAE piloto industrial instalado na Termogal norteou este trabalho. A vazão de serviço e capacidade de uso do reator piloto industrial está fundamentada na necessidade da geração de uma determinada massa de reagente a ser produzida “in situ”, previamente estabelecida. Cada módulo ECOFAE atualmente desenvolvido para finalidade comercial objetiva produzir a massa de 1,0419 g de ferro ou 0,3356 g de alumínio por ampere hora e tempo de residência médio de 3 minutos para o efluente percolado, resultando rendimento eletroquímico acima de 80% para os íons metálicos. O pH do influente é ajustado antes de sua entrada no reator ECOFAE numa faixa entre 5 a 6,5, recalcado por bomba de diafragma para primeira separação física em filtro prensa, seguindo o filtrado para o estágio eletrolítico no reator ECOFAE, este contendo flocos coagulados e flotados seguem posteriormente para o decantador lamelar para, após a separação de fases e filtração em filtro

prensa final, percolar o filtrado no reator com resinas de troca iônica para ser reutilizado em circuito fechado (ARAUJO; KATZ, 2009). O reator ECOFAE piloto de bancada para este trabalho foi construído numa montagem mostrada nas figuras 1 e 2, usando uma cuba de polipropileno com capacidade útil de 5 litros, em regime de batelada, contendo um arranjo de eletrodos espaçados em 0,015m intercalados na ordem catodo-anodo-catodo, 7 catodos de aço inox 304, 5 anodos de alumínio e 1 anodo de ferro.

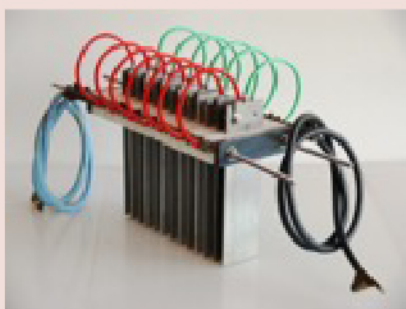


Figura 1 - Arranjo de eletrodos do ECOFAE piloto de bancada

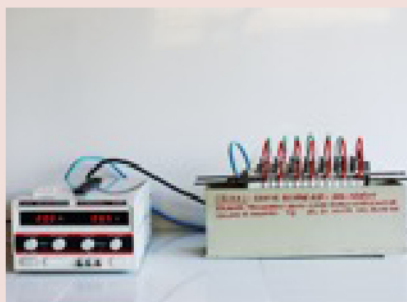


Figura 2 - Montagem do circuito completo da eletrólise no reator ECOFAE de bancada piloto

A área superficial em contato com o EP durante a eletrólise foi de 0,06156 m² para anodos e igual para os catodos, sendo as áreas distribuídas entre os dois tipos de materiais, respectivamente 1/6 para o anodo de ferro e 5/6 para os anodos de alumínio. O circuito elétrico utilizado para os eletrodos foi em paralelo.

Neste estudo, após ensaios eletroquímicos preliminares, estabeleceu-se um modelo de célula eletrolítica em escala de bancada para tratar uma alíquota de 4 litros do EP previamente caracterizada usando a tecnologia ECOFAE em regime de batelada. O EP foi cedido pela empresa Tecnograv - Serviços de

Gravação Eletromecânica Ltda, Salto - SP, O resíduo líquido estudado foi gerado na eletrodeposição de cobre e cromo para fabricação dos cilindros de rotogravura, cuja atividade é utilizadora de grande quantidade de água e metais em sua operacionalização.

O objetivo principal do estudo foi a remoção de cobre (II) e cromo (VI) do EP no reator ECOFAE piloto de bancada, entretanto, para este tipo de composição química contendo diversidade iônica não existe uma tecnologia capaz de isoladamente remover todos os seus contaminantes sem combinação posterior com outra tecnologia de mitigação.

3.1.1 ESTUDO PRELIMINAR

A amostra utilizada do EP tinha inicialmente pH 1,9 e foi convencionado ajustar para pH 6,0 usando Hidróxido de Sódio, uma vez que o uso de Hidróxido de Cálcio aumentaria ainda mais o teor do seu cátion e este se constitui um problema de deposição na tubulação do VD atualmente na EE. A decisão de ajuste do pH 6,0 ocorreu após ensaiar três alíquotas do EP de 0,25 L, com a densidade de corrente que foi usada posteriormente no teste do EP, onde nesses ensaios, foi feita uma eletrólise com pH 1,9 inicial e tempo de 210 minutos finalizando em pH 10; a segunda eletrólise com pH 6 ajustado com Hidróxido de Cálcio inicial e tempo de 60 minutos finalizando em pH 10; a terceira eletrólise com ajuste de pH com Hidróxido de Sódio e tempo de 30 minutos finalizando em pH 10. Nestes três ensaios preliminares não foi feita reversão de polaridade de corrente nos eletrodos cujo conjunto montado era com dois anodos, sendo um ferro e outro alumínio e um catodo de inox 304. Após eletrolisar as 3 alíquotas do EP e filtrar em papel filtro, a FL resultante de cada uma delas foi testada com Kit colorimétrico Merck para cobre (II) e cromo (VI), resultando nos 3 casos mitigação dos resíduos abaixo de parâmetros legais de lançamento em corpos de água, conforme Resolução CONAMA nº 430/11 (2011). O estudo preliminar foi realizado sem conhecimento prévio da composição do EP, uma vez que a decisão para continuidade do estudo e caracterizações necessárias foram solicitadas pela EE posteriormente.

3.1.2 PARÂMETROS DE CARACTERIZAÇÃO E ESTABELECIMENTO DAS CONDIÇÕES PARA OS PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Estabeleceu-se que o EP, FL e FS seriam caracterizados em laboratório acreditado INMETRO ABNT NBR ISO/IEC 17025, para os parâmetros físicos e químicos constituintes: pH, condutividade, alcalinidade de carbonatos, alumínio, arsênio, bário, boro, cádmio, cálcio, carbonatos, chumbo, cianeto (total e livre), cloro total, cobre, cromo total, estanho, ferro total, fluoreto, fósforo, magnésio, manganês, mercúrio, níquel, nitrogênio amoniacal, nitrogênio total, potássio, prata, selênio, silício, sódio, sulfato, sulfeto, zinco. Para FS caracterização somente dos elementos metálicos grifados em itálico acima.

Logo após o recebimento do laudo de caracterização do EP e com base no estudo preliminar decidiu-se testar o volume de 4 L do EP no arranjo conforme figura 2 anterior, usando tempo de 100 minutos com corrente contínua normal e 100 minutos com a corrente contínua na polaridade reversa do conjunto de eletrodos mostrado na figura 1, alternando em ciclos de 5 minutos. Foi utilizada uma fonte de alimentação de corrente contínua digital assimétrica de fabricação Instrutherm modelo DC Power Supply FA 2030 com Ripple e Ruído: 3mVRMS e precisão de corrente: $\pm 1,5\% + 2$ dígitos. Durante a eletrólise ar foi insuflado na solução para homogeneizar o EP usando um soprador de ar Hailea modelo ACO6602. Os dados da execução do ensaio com o EP estão descritos adiante em 3.3.1. Ao finalizar o tempo de eletrólise o EP tratado no reator ECOFAE foi filtrado, o resíduo sólido foi seco inicialmente por 24 horas ao sol e depois em estufa por 5 horas a 98°C e triturado em almofariz. Ambos FL e FS enviados para as caracterizações nos laboratórios externos.

3.2 O PROCESSO INDUSTRIAL NA EMPRESA ESTUDADA

Galvanoplastia é a denominação genérica para designar a atividade de tratamento de superfícies quando se utilizam processos químicos e eletroquímicos e os processos produtivos ocorrem em equipamentos individuais dispostos em linha ou células, cuja operacionalização pode ser automática ou manual, conforme ilustrado nas figuras 3 e 4.



Figura 3 - Vista geral da linha galvânica para eletrodeposição de cobre e cromo em cilindros de rotogravura



Figura 4 - Cilindros de rotogravura na linha de eletrodeposição de cromo e cobre



Figura 5 - “Vista A”- reservatório enterrado para armazenagem temporária dos resíduos líquidos

O processo consiste de um agrupamento de operações unitárias que normalmente se iniciam com a montagem de peças em ganchos ou sua colocação dentro de tambores rotativos apropriados para receberem a sequência operacional química e eletroquímica que permitirá ao final, obtenção do revestimento metálico ou não, sobre as peças, com diversa finalidade que poderá ser técnica ou decorativa. No caso da EE é revestimento técnico de cobre e cromo em cilindros de aço carbono com a finalidade posterior de gravação de imagens para impressão em processos de rotogravura.

Para revestir um objeto seja ele de qualquer substrato, no caso da EE revestimento com dois metais, cobre e cromo sobre uma peça de substrato aço carbono, são necessárias etapas diversas no processo químico e eletroquímico e entre as etapas onde há reações do meio com a peça, sempre há necessidade das etapas de lavagens intermediárias com elevado consumo de água e contaminação delas com substâncias químicas contendo ânions e cátions geralmente complexados e difíceis de mitigar por RFQ ou VD.

Na sua atividade industrial uma das principais matérias primas utilizadas é a água potável servida pela concessionária municipal e de captação de chuva, utilizada tanto na preparação das soluções químicas quanto nas lavagens dessas soluções arrastadas nas peças, constituindo assim um resíduo líquido contaminado com metais na sua operacionalização. Em decorrência do processo galvânico e após o uso dessa água, caso não ocorresse sua mitigação na EE a poluição de mananciais seria extremamente elevada e contribuiria para



Figura 6 - “Vista B”- reservatório enterrado para armazenagem temporária dos resíduos líquidos

outras formas de poluição industrial, como atmosférica e de solos. Na EE o resíduo líquido é armazenado em tanques enterrados, figuras 5 e 6, e posteriormente recalado para nível superior de piso para concentração no VD.

Atualmente na EE o tratamento dos resíduos líquidos é realizado no VD, reduzindo-se o volume em torno de dez por cento e concentrando os em média dez vezes para posterior destinação legal para queima em forno de cimento, quando toda a fase líquida é convertida em vapor resultando em sais inertes que poderão ser agregados em produtos cimentícios. O VD resulta em 68,5% de retorno de água para reuso em circuito fechado, com base nos dados obtidos neste estudo usa 155 kWh.m⁻³ de água tratada, gerando 0,318ton de resíduos líquidos concentrados, classe I conforme a norma técnica específica (ABNT NBR 10004, 2004).

A técnica ECOFAE desenvolvida por este autor também pode ser aplicada para minimizar adições de substâncias químicas em reações físico-químicas tradicionalmente utilizadas nos STAR's de empresas com similaridade de processos, dentre outras.

O efluente que sair do reator ECOFAE, que poderá ser implantado na EE, após deverá passar por filtração de partículas sólidas em filtro prensa, figura 7, poderá ser percolado no VD, figuras 8 e 9 e polido em colunas contendo resinas de trocas iônicas (IER), figura 10, resultando de uma água desmineralizada e menor massa de resíduo sólido. Dessa maneira, no mínimo 80% da água de processo industrial poderá ficar em circuito fechado permitindo seu reuso continuamente.

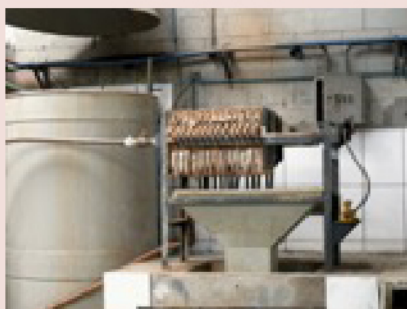


Figura 7 – Filtro Prensa



Figura 9 – Equipamentos acessórios do destilador à vácuo



Figura 8 – Destilador à vácuo



Figura 10 – Trocador iônico com resinas para polimento da água de reuso em circuito fechado

3.3 ANÁLISE DOS DADOS E INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS

3.3.1 DADOS DA REALIZAÇÃO DO ENSAIO COM O EFLUENTE ESTUDADO

Neste tópico estão descritos dados de execução do ensaio com o reator ECOFAE e resultados obtidos, onde a duração da eletrólise de um volume de 4 litros do EP foi de 200 minutos sendo um tempo de 100 minutos com corrente contínua normal e 100 minutos com a corrente contínua na polaridade reversa do conjunto de eletrodos espaçado em 0,015m, mostrado na figura 1, alternando em ciclos de 5 minutos. A tensão média aplicada no circuito eletroquímico durante o ensaio foi 5,93 V, com intensidade de corrente média de 20,9 A e densidade de corrente de 339,51 A m⁻², e a razão de corrente contínua total aplicada no volume do EP 17,42 Ah L⁻¹. A quantidade de corrente total aplicada no volume em teste do EP na eletrólise foi 69,67 Ah. Durante o tempo de eletrólise do EP, foi insuflado ar a razão de 0,240 m⁻³h⁻¹ e pressão 0,013Mpa para homogeneizar o EP. A potência elétrica necessária para este experimento considerando vazão 0,004 m⁻³h⁻¹, e tempo de 200 minutos foi P =103,28kW h m⁻³.

A figura 11 resume o processo de eletrólise no reator ECOFAE piloto de bancada estudado.



Figura 11 – Síntese do processo usado para mitigar o EP com ECOFAE

3.3.2 RESULTADOS DAS CARACTERIZAÇÕES DO EP, FL, FS

Os laudos foram obtidos através dos relatórios: para o EP, RE AMPRO n° 13728.2015.A/B-V.0 de 29/06/2015; para o FL, RE AMPRO n° 19227.2015.A/B-V.0 de 31/08/2015, ambos laudos emitidos por laboratório acreditado ABNT NBR ISO/IEC 17025:2005, INMETRO – CRL 0458; e para o FS, RE CA n° 10000/15 de 25/09/2015, laudos emitidos por laboratório acreditado ABNT NBR ISO/IEC 17025:2005, INMETRO – CRL 0353. Os parâmetros alcalinidade de carbonatos, arsênio, boro, cádmio, cianeto (total e livre), cloro total, mercúrio, prata, selênio, silício, sulfeto, foram analisados no EP e FL e seus valores em ambos laudos reportaram valores inferiores aos limites de quantificação, por esse motivo não constam da tabela 2 abaixo, que apresenta resumo dos resultados extrapolados dos laudos analíticos para os quantitativos do EP, FS e FL, com respectivas informações de rendimento percentual para remoção de cada componente do EP.

3.3.3 DISCUSSÃO

A quantidade de corrente aplicada na eletrólise do EP foi 69,67Ah sendo metade usada na polaridade reversa. Para cálculo de massas corroídas nos dois tipos de eletrodos usados considera-se 34,83 Ah na polaridade normal, sendo que 1/6 foi usado pelo anodo de ferro e 5/6 pelos anodos de alumínio, respec-

tivamente para rendimento teóricos: 5,805 Ah para o ferro corroendo a massa teórica de 100% de 6,048gFe; e, 29,025 Ah para o alumínio corroendo a massa teórica de 100% de 9,7408gAl. De acordo com o balanço de massas, usando dados dos laudos analíticos temos resultados práticos respectivamente 9,48Ah resultando em 9,88gFe e 19,17Ah resultando em 6,43gAl gerados in situ durante a eletrólise do EP. Dessa maneira, os rendimentos eletroquímicos parciais foram Fe =163,36% e Al = 66,01%. Quando analisamos o rendimento da somatória de contribuição para os dois metais dos anodos relativos a 28,65 Ah teremos 82,26% de rendimento eletroquímico na geração de íons metálicos in situ no reator ECOFAE deste trabalho e o restante 17,74% contribuiu para a geração de hidrogênio e oxigênio.

Ambos os gases gerados in situ podem ser calculados, para o hidrogênio temos equivalente eletroquímico 0,037656 g A-1h-1 e para o oxigênio 0,298476 g A-1h-1, (BERTORELLE, 1974). Podemos considerar que a intensidade de corrente contínua restante igualmente dividida para ambos, 3,09 Ah para cada um, durante a eletrólise gerou 0,11635704g O₂ e 0,92229084g H₂ usados para a eletroflotação. Quando pesquisamos efluentes mistos de composição muito diversificada, parte dessa composição nem sempre é caracterizada, focamos o elenco de íons a caracterizar naqueles que apresentam maiores riscos de causar impactos ambientais, portanto, na demonstração acima considerou-se apenas hidrogênio e oxigênio, como a parte restante que foi gerada in situ na eletrólise. Se cloro estiver presente no eletrólito é contribuinte para as reações eletroquímicas pela sua reatividade e também pela capacidade de desinfecção de agentes patogênicos.

Após o tempo de eletrólise do volume inicial de 4 L do EP no ECOFAE observou-se que a temperatura final estava em 42°C, com perda de volume ocorrida por reações de produção de O₂ e H₂ e resultou no volume para ser filtrado de 3,440 L. Na filtração usando papel filtro por gravidade resultou outra perda de volume finalizando com 2,67 L de FL a caracterizar e demonstrar sua qualidade como água de reuso.

Tabela 2 – Resultados de caracterização do EP, FL e FS para quantitativos do ensaio

Componente físico ou químico analisado	Massa de contaminante em 4,0 litros de EP mg	Massa de contaminante em 3,44 litros de FL após tratamento no ECOFAE mg	% residual na amostra tratada	% remoção da amostra tratada	% aumento do componente na amostra tratada no ECOFAE	Massa total (8) contaminante presente na massa de resíduo seco (75,8977g) FS mg
pH	1,90	10	-	-	-	-
Condutividade	14320 $\mu\text{S.cm}^{-1}$	1165 $\mu\text{S.cm}^{-1}$	8,14	91,86	-	-
Alumínio (1)	19,324	39,206	235,91	-	135,91	6413,36
Bário	23,468	0,017	0,09	99,91	-	0,0076
Cálcio	1133,736	45,229	4,64	95,36	-	504,72
Chumbo	6,416	< 0,017 (LQ)	0,31	99,69	-	0,007590
Cobre	692,768	< 0,017 (LQ)	0,00245	99,998	-	459,94
Cromo Total	1123,184	< 0,017 (LQ)	0,000015	99,999	-	1085,34
Estanho	1,520	< 0,017 (LQ)	1,32	98,68	-	NA
Ferro Total (2)	136,308	< 0,172 (LQ)	0,15	99,85	-	10018,50
Fluoreto (3)	4,808	6,570	158,90	-	58,90	NA
Fósforo (4)	0,160	39,835	28950,00	-	28850,00	NA
Magnésio	143,224	5,212	4,23	95,77	-	264,12
Manganês	1,100	< 0,017 (LQ)	1,82	98,18	-	NA
Níquel	31,820	10,117	36,97	63,03	-	171,53
Nitrogênio Amoniacal	35,400	28,036	92,09	7,91	-	NA
Nitrogênio total	200,000	65,360	38,00	62,00	-	NA
Potássio (5)	25,996	26,240	117,37	-	17,37	4,30
Sódio (6)	6200,000	7949,840	149,10	-	49,10	270,95
Sulfato (7)	8340,000	12384,000	172,66	-	72,66	NA
Zinco	10,932	< 0,017 (LQ)	0,18	99,82	-	16,93

(1) ,(2) (4) corroídos durante a eletrólise, sobrando excesso de alumínio na FL

(3) aumento sem origem conhecida

(5), (6) aumentou devido ajuste de pH com solução NaOH 50% comercial.

(7) Sulfato aumentou na amostra EP após ajuste do pH 6,00 com solução NaOH 50% comercial. E foi comprovada sua presença na referida solução, causando interferência para análise de resultados, deve ser descartado o seu resultado na amostra FL

(8) durante o ensaio houve perda de pequena quantidade de massa de resíduo sólido, a quantidade final seria maior

LQ Limite de quantificação

NA Não analisado no resíduo sólido.

4. CONCLUSÃO

Considera-se que o objetivo deste trabalho foi atingido para a remoção de 99,99% de cobre (II) e cromo (VI) provando a viabilidade técnica e econômica para uso da tecnologia de ECOFAE. Outros componentes do EP também foram mitigados, além do que a condição final do FL permite reuso da água do processo industrial em regime de circuito fechado em vários processos intermediários de uma linha galvânica.

Estudo de viabilidade técnica e econômica preliminar realizado junto a EE, usando como referência este trabalho e adaptado a sua necessidade demonstram que atualmente a operação de mitigação incluindo terceiros usando o VD custa R\$ 357,35 / m³ de água tratada salvando 68,5% de água e com reator ECOFAE R\$ 143,60 / m³ de água tratada salvando 86% de água no processo. Em relação a massa comparada, o ECOFAE salva 86% na geração de resíduos a destinar legalmente.

Em relação ao consumo energético ECOFAE é 73% mais econômico que o VD. A tecnologia ECOFAE proposta para a EE, se implantada, resultará 59% de economia no custo operacional. Com a economia do custo atual no VD, o payback estimado para um investimento de R\$ 200.000,00 reporta um prazo de 15 meses para implantar o reator ECOFAE em substituição ao VD na EE. Os dados obtidos neste estudo comprovam a viabilidade do uso de ECOFAE para mitigar os resíduos líquidos na EE e são promissores para implantar em outras indústrias similares permitindo a fábrica do futuro operacionalizar sistemas de P+L garantindo em parte sua sustentabilidade nessa questão. Estudos com novos eletrodos, corrente pulsante reversa e uso de matriz energética fotovoltaica em substituição a matriz energética hidráulica serão realizados para uso no reator ECOFAE e desenvolvimentos futuros são promissores.

5. REFERÊNCIAS

- ANGELIS, D.F.; BIODIA, E.D.; CORSO, C.R.; et al. *Eletrolise de resíduos poluidores. I - Efluente de uma indústria liofilizadora de condimentos*, Química Nova, 21, p. 20-24, 1988.
- ARAÚJO, P.; KATZ, J. *Descarte zero de efluentes galvânicos - uso do reator de eletrocoagulação-flotação de alta eficiência combinado com resinas de troca iônica para tratamento de efluente de galvanoplastia*. In: XIII- Ebrats - Encontro e Exposição Brasileira de Tratamentos de Superfícies, Anais, São Paulo - Brasil, 2009.
- BERTORELLE, E. *Trattato di galvanotecnica*. Milão, Itália, Ed. Ulrico Hoepli, 4^a edição. Vol. I, 1974. 1290 p.
- BEYAZIT, N. *Copper (II), chromium (VI) and nickel (II) removal from metal plating effluent by electrocoagulation*. Int. J. Electrochem. Sci., 9, p. 4315 - 4330, 2014
- CETESB. *Avaliação das células eletrolíticas da instalação piloto de tratamento de esgotos da cidade de Marília - Relatório Final*. São Paulo, SP, p. 2, 1988.
- CODATA. *NIST data*. Disponível em http://physics.nist.gov/cgi-bin/cuu/Value?f90|search_for=faraday, acesso em 24/9/2015

- CRESPILHO, F.N.; REZENDE, M.O.O. *Eletroflotação - princípios e aplicações*. Rima, São Carlos, SP, 2004. 86p.
- DERMENTZIS, K.; CHRISTOFORIDIS, A.; VALSAMIDOU, E.; *Removal of nickel, copper, zinc and chromium from synthetic and industrial wastewater by electrocoagulation*. *International Journal of Environmental Sciences*, Volume 1, Nº 5, p.701, 2011.
- DI BERNARDO, L. *Métodos e técnicas de tratamento de águas*. Rio de Janeiro, RJ, Ed. ABES (Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental), p.443, 1993.
- FELTRE, R.; YOSHINAGA, S. *Físico-Química*. São Paulo, SP, Ed. Moderna, 2ª ed. p.197, 1968.
- FERREIRA, L.H. *Eletroflotação - Sua história e variáveis*. 1ª Edição. São Paulo, SP, Ed. Clube de Autores, 2010. 85p.
- GERISCHER, H. et all. *The CRC Handbook of solid state electrochemistry*. New York, USA, CRC Press, Inc. cap.2, p.19, 1997.
- GLINKA, N.L. *Problems in general chemistry*. Moscow, USSR, Ed. Mir Publishers, p.201-203, 1973.
- HERMITE, E.; COOPER U. P.; *US Patent nº 378681-Apparatus for Bleaching by electrolysis,1888*. Disponível em <http://www.google.es/patents/US378681>, acesso em 11/09/2015
- IFSC. *Resistência e corrente elétrica*. Apostila Laboratório de eletricidade e magnetismo. Ed. Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2015, disponível em <http://www.ifsc.usp.br/~hoyos/courses/2010/SLCo574/04-ResistenciaCorrenteEletrica.pdf>, acesso em 24/9/2015
- INMETRO. *Sistema internacional de unidades*. Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia - INMETRO, Rio de Janeiro, RJ, 2012, 93p.
- Norma ABNT - NBR 10004:2004 - *Classifica os resíduos sólidos quanto aos seus riscos potenciais ao meio ambiente e à sua saúde*. 71p.
- Resolução CONAMA nº 430 de 13 de maio de 2011. *Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução nº 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente-CONAMA*.
- VOGEL, A. I. *Análise química qualitativa*. Rio de Janeiro, RJ, Ed. LTC, 5ª edição. p. 409-410, 1988.
- WEBSTER, W. *US Patent nº 398101- Process of purifying sewage by electricity, 1889*. Disponível em <https://www.google.com/patents/US398101>, acesso em 11/09/2015
- WIENDL, W.G. *Processo eletrolítico no tratamento de esgotos sanitários*. Rio de Janeiro, RJ, Ed. ABES (Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental), 1998, 368p.
- ZOULIAS, E.; VARKARAKI, E.; LYMBERPOULOS, N.; et al. *A review on water electrolysis*. Centre for Renewable Energy Sources (CRES), Ed. Cyprus, Píkermi, Greece, disponível em <http://www.cres.gr/kape/publications/papers/dimosieyseis/hydrogen/A%20REVIEW%20ON%20WATER%20ELECTROLYSIS.pdf>, acesso em 24/9/2015

PEDRO DE ARAÚJO
pdearaujo64@gmail.com

MBA em Gestão Ambiental e Desenvolvimento Sustentável, Pós Graduando em Perícia e Auditoria Ambiental, Tecnólogo em Gestão Ambiental, Técnico Químico, Consultor Galvanotécnico e Ambiental, atua no setor de tratamento de superfícies há 37 anos, de “A” a “Z”, com análise e otimização de processos galvânicos, redução dos custos da produção, formulações de processos especiais, desenvolvimento de equipamentos especiais que incorporam inovações tecnológicas (linhas automáticas e manuais), ETE'S compactas, inovação tecnológica de antigas patentes em tecnologias como: eletrocoagulação-flotação de alta eficiência, resinas de troca iônica, electrowinning, sistema de eletrodeposição em bateladas sem geração de efluente, tambores rotativos especiais, filtros, etc. Na área ambiental atua em projetos para atendimento de estudos, planos e programas ambientais requeridos nos procedimentos de licenciamento ambiental, especialmente direcionados para produção mais limpa e galvanoplastia sustentável no setor galvanotécnico