

# Aplicação do Tratamento Eletrolítico a Efluente Petroquímico

Alexandre Botari, Claudio da Rocha Brito e Melany M. Ciampi

**Resumo** — O processo eletrolítico de tratamento consiste na aplicação de descargas elétricas no efluente através de uma célula dotada de eletrodos alimentados por uma fonte de corrente contínua, proporcionando ao efluente oxigenação e diversas reações de dissociação e ruptura nas cadeias moleculares orgânicas mais complexas. O processo eletrolítico pode ser aplicado ao tratamento de efluentes industriais petroquímicos, permitindo uma aceleração no processo de oxidação e posterior degradação da carga poluente, reduzindo, destarte, o tempo do tratamento e os custos de implantação do mesmo. Os resultados experimentais demonstram a aplicabilidade do processo, devendo-se proceder a uma posterior análise mais detalhada do custo/benefício.

**Palavras-chave** — Tratamento, Eletrolítico, Petroquímico Degradação, Efluente.

## I. INTRODUÇÃO

Diante das perspectivas de disponibilidade de água potável no terceiro milênio, cresce a preocupação da sociedade com a destinação final dos efluentes (lançamento no corpo hídrico receptor), especialmente o efluente industrial, que em inúmeros casos, pode ser muitas vezes mais pernicioso ao meio ambiente que o efluente doméstico.

Neste particular, muito tem sido feito a fim de mitigar os efeitos do despejo deste tipo de efluente no meio ambiente, especialmente face às exigências dos consumidores dos produtos finais destas industriais, bem como da sociedade de uma forma geral, que mais cônica da necessidade de preservar o meio ambiente, aprovam a recente legislação mais rígida e punitiva para estes particulares casos[1].

Baseado no simples e largamente conhecido efeito eletrolítico, ou seja, a quebra de moléculas pela ação de corrente elétrica ou campo elétrico, o processo de eletrólise tem sido extensivamente usado em diversas aplicações na indústria, sobretudo química, como por exemplo, na obtenção de compostos orgânicos.

Este trabalho pretende analisar a viabilidade da aplicação do processo eletrolítico para o tratamento de efluente petroquímico, tipicamente encontrado na Refinaria Presidente Bernardes de Cubatão – RPBC, situada no parque industrial petroquímico da Baixada Santista.

O trabalho está dividido em dois blocos principais: a célula eletrolítica, onde ocorre, em regime de batelada, o tratamento

eletrolítico do efluente e a análise físico-química dos parâmetros que caracterizam a qualidade do efluente (antes e depois do tratamento).

A fim de quantificar a eficiência do processo eletrolítico de tratamento, este trabalho se propõe a analisar quatro aspectos principais, a saber: parâmetros elétricos, parâmetros eletroquímicos, parâmetros físico-químicos e parâmetros físicos.

Os parâmetros físico-químicos são, consagradamente, os parâmetros a serem quantificados para a determinação da eficiência de qualquer tipo de tratamento de efluentes, especialmente os baseados em processos microbiológicos. Entretanto para o processo eletrolítico há, ainda, a necessidade de se determinar parâmetros inerentes ao mesmo, a saber: elétricos e eletroquímicos, conforme sugerido por [1][2].

Esta seção abordará aspectos teóricos individuais de cada um dos quatro parâmetros supracitados que serão discutidos e quantificados nas seções seguintes.

## II. PARÂMETROS DO PROCESSO ELETROLÍTICO DE TRATAMENTO DE EFLUENTES

### A) PARÂMETROS ELÉTRICOS

A partir das equações básicas da eletricidade, podemos estabelecer as relações entre os parâmetros elétricos mensuráveis da cuba eletrolítica com o propósito de determinar a potência que será exigida pelo processo. Como eletrodos para a célula eletrolítica, utilizou-se placas planas de alumínio, embora a literatura não aponte este material como o mais indicado para este uso[2-7].

Entretanto, íons  $Al^{3+}$  desprender-se-ão do eletrodo anódico de alumínio, durante a eletrólise, e estes funcionarão como auxiliar no processo de coagulação do material orgânico em dissolução ou em suspensão presentes no efluente. Outro fator incisivo na escolha do material, foi de ordem econômica, visto que o preço do alumínio comparado com outros materiais, tais como platina ou carbono, mostrou ser o mais factível. A razão da escolha da geometria e a disposição dos eletrodos na cuba eletrolítica será discutida nas seções seguintes.

Haverá, uma diferença de potencial entre a placa A e a placa B, (fig. 1), havendo a presença de um fluxo de um campo Elétrico através do efluente existente entre elas, conforme (1):

$$U = R \cdot i \quad (1)$$

Onde  $V$  é a diferença de potencial;  $R$  é a resistência medida em Ohms [ $\Omega$ ] e  $i$  a corrente elétrica.

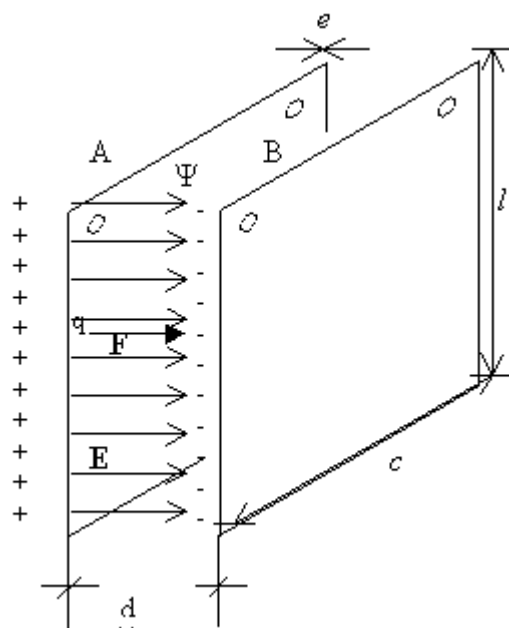


Figura 1: Esquema dos Eletrodos (Placas Paralelas) da cuba eletrolítica

A resistividade das placas é o parâmetro elétrico mais importante a ser determinado e minimizado, uma vez que a parcela de potência dissipada pelo elemento resistivo é a mais significativa no circuito da célula eletrolítica.

É oportuno abordarmos a definição de resistor e resistividade. O resistor é o elemento de um circuito, cuja principal função é oferecer, como o próprio nome diz, uma resistência específica a este circuito. Trata-se de um nome adequado, uma vez que quanto maior a resistência ao fluxo de carga, menor será a corrente que passa pelo resistor [8], conforme pode ser visto a equação 16, que é chamada de primeira Lei de Ohm.

A resistividade depende intrinsecamente do material do resistor. Neste trabalho consideraremos dois principais elementos cuja resistividade será objeto de atenção, a saber: o alumínio (alumínio  $\rho \approx 2,8 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$  a  $20^\circ$ ), material das placas da cuba eletrolítica e o próprio efluente entre as placas (dielétrico), meio no qual se propaga o campo elétrico (efluente  $\rho \approx 6,5 \cdot 10^{-2} \Omega \cdot m$  a  $25^\circ$ , medido na cuba eletrolítica, durante as experimentações, com o auxílio de um condutímetro)

Considerando-se a densidade de corrente uniforme por toda a placa, o que implicará numa distribuição uniforme da densidade de corrente e do campo elétrico. Sendo assim, através da 2ª Lei de Ohm, pode-se relacionar o material e a geometria do condutor, onde a resistência ( $R$ ) na placa é inversamente proporcional à área da seção transversal ( $A$ ):

$$R = \rho \cdot l / A \quad (2)$$

Onde  $R$  é a resistência elétrica,  $\rho$  é a resistividade própria do material,  $l$  é o maior comprimento da placa e  $A$  é a área da seção transversal placa.

É necessário fornecer energia para se manter a corrente  $i = dq / dt$  por um determinado tempo, e esta energia ( $P$ ) corresponde a uma potência ( $P = \text{Watt}$ ). Como em outros processos mecânicos, onde há atrito, que neste caso, será dissipada em forma de calor. Esta conversão de energia elétrica em calor é conhecida como efeito Joule, e é expressa forma (3):

$$dP = i \cdot dt \cdot V \rightarrow dP / dt = dt \cdot i \cdot V = dP \quad (3)$$

No entanto a 1ª Lei de Ohm nos diz que  $V = R \cdot i$ , portanto a (3), ficará (4):

$$dP = R \cdot i^2 \cdot dt \quad (4)$$

Substituindo-se (2) em (4), e integrando membro à membro, teremos a potência dissipada pelo elemento resistivo, através de (5):

$$P = (i^2 \cdot t \cdot \rho \cdot l) / A \rightarrow (i^2 \cdot t \cdot \rho \cdot l) / 2ec \quad (5)$$

Onde  $i$  é a corrente elétrica,  $t$  é o tempo (horas),  $\rho$  é a resistividade própria do material,  $l$  é o maior comprimento da placa e  $A$  é a área da seção transversal placa ( $e =$  espessura e  $c =$  largura da placa, conforme fig. 1).

Neste tocante, a geometria é um fator bastante negativo, uma vez que as placas possuem uma área de seção transversal  $A$ , conforme fig. 1:  $A =$  espessura ( $e$ ) x comprimento menor ( $2 \cdot c$ ). Note que a área  $A$  é extremamente menor que o maior comprimento  $l$  ( $A \ll l$ ), o que aumentará consideravelmente a perda de energia por efeito Joule (dissipação em forma de calor).

O efeito Joule, como é conhecido, é relativo à liberação de calor em um condutor percorrido por uma corrente elétrica. A quantidade de calor  $W$  ( $P$ ) liberada durante um tempo  $t$ , em um condutor considerado homogêneo, é dado através de (5)[9].

A equação (5) demonstra um fator importante da geometria, entretanto há, um outro fator que, a despeito das perdas de energia, torna vantajosa essa geometria, que é a de permitir uma maior superfície (área) de contato entre o efluente e os eletrodos, e por conseguinte, uma maior influência do campo  $E$  sobre o efluente presente entre as placas, durante o tempo de detenção do mesmo. Este fator é que se mostrou preponderante na escolha da geometria.

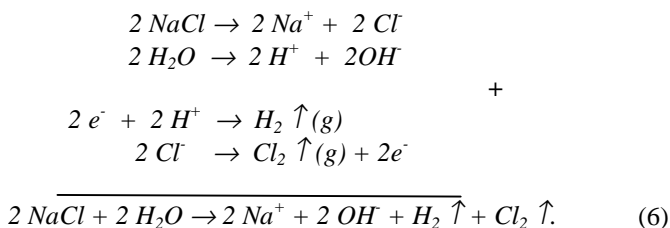
## B. PARÂMETROS ELETROQUÍMICOS

Evidentemente, a condutividade do efluente, ou seja, a capacidade de conduzir corrente elétrica (transportar a carga  $q$  de um ponto, na placa A, para o um outro ponto, na placa B, conforme fig. 1) deverá ser diretamente proporcional à quantidade, presente no líquido, de elementos eletrólitos (íons condutores).

Estes elementos eletrólitos são os responsáveis pela condução da corrente e a propagação das linhas de campo no dielétrico, que é o efluente na cuba eletrolítica. Fica portanto

evidenciado que quanto maior for a concentração destes elementos eletrólitos no efluente, maior será sua capacidade de condução de corrente elétrica e maior será a possibilidade de ocorrência de reações entre as substâncias presentes (influenciadas pelo potencial elétrico).

Para ilustrar, podemos utilizar um exemplo, bastante conhecido, de uma cuba eletrolítica com um determinado volume de água e, em dissolução, uma determinada massa de sal (NaCl). Escreveremos, pois, seu balanceamento conforme (6)[10]:



No entanto existem outras condições a serem levadas em consideração, visto que o cátodo e o ânodo, que são de mesmo material (alumínio), deverão agir como eletrodos ora ativos ora inertes, ou seja, sofrerão redução e/ou oxidação ou não, respectivamente. Isto significa que íons de  $\text{Al}^+$  poderão se desprender do eletrodo, participando, ou não, das diversas reações que ocorrerão na cuba eletrolítica sob a influência do campo elétrico, o que seguramente fornecerá um potencial coagulante para a matéria orgânica presente no efluente.

Haverá, ainda, competição entre os íons presentes no efluente, para a descarga dos mesmos, ou seja, dependendo dos íons presentes, alguns sofrerão oxidação/redução primeiro, em detrimento de outros íons, dependendo de seus potenciais de oxidação/redução [11].

Os elementos orgânicos presentes no efluente sofrerão, também, a ação da corrente elétrica, podendo ocorrer diversas reações de “quebra” (lise) de moléculas maiores, bem como o “arraste” dessas moléculas pelos íons carregados na eletrólise, ou rumo ao eletrodo ou, pelo “arraste” dos gases, rumo à superfície do fluído (espuma).

Espera-se, portanto, que os elementos eletrólitos (íons e metais), presentes no efluente, acabem por reduzir-se ao longo do processo, ou por fixarem-se ao cátodo, ou por serem carregados (voláteis) nos gases que se desprenderão no processo, conforme é demonstrado em (6).

A escolha da forma dos eletrodos considera a superfície de contato entre o ânodo e o efluente, uma vez que íons  $\text{Al}^+$  ao se desprenderem da placa poderão proporcionar a coagulação do material em suspensão e em dissolução, auxiliando no processo de tratamento, como já mencionado. A disposição geométrica das placas planas e paralelas, igualmente espaçadas entre si, também atenta para este fator. Outra decisão tomada experimentalmente quanto à disposição dos eletrodos, foi o posicionamento de um eletrodo maior no fundo da cuba, uma vez que os gases desprendidos na eletrólise da água, entre outras reações, funcionaria como veículo para o transporte de material coagulado rumo à superfície livre do efluente.

Através das Leis de Faraday, pode-se efetuar um estudo quantitativo da eletrólise. Basicamente experimental, a 1ª Lei de Faraday, nos diz que a massa (m) de substância eletrólizada é diretamente proporcional à quantidade de eletricidade (Q) que atravessa a solução, conforme pode ser visto em (7):

$$m = K \cdot Q \quad (7)$$

Onde K é uma constante, determinada experimentalmente e é igual a  $1/96500$ , sua unidade é  $\text{C}^{-1}$ . Ao passo que a quantidade Q é determinada conforme (8):

$$Q = i \cdot t \quad (8)$$

Onde i é a intensidade da corrente e t o tempo de eletrólise.

A 2ª Lei de Faraday nos informa que a mesma quantidade de eletricidade irá eletrólisar massas (m) de substâncias diferentes, que serão proporcionais aos seus respectivos equivalentes-grama (E) de oxidação/redução, na forma de (9):

$$m = K \cdot E \quad (9)$$

Verifica-se, experimentalmente, que ao se passar uma quantidade de eletricidade (Q) igual a 96500 Coulombs, a massa eletrólizada (m), será igual ao Equivalente grama (E), qualquer que seja o eletrólito utilizado.

Portanto, ao reunirmos (7), (8) e (9), teremos (10):

$$m = K \cdot E \cdot i \cdot t \quad (10)$$

A equação (10) é importante pois através dela podemos relacionar os parâmetros elétricos e químicos mensuráveis na cuba eletrolítica. A quantidade 96500 Coulombs é denominada um FARADAY (F), ela é importante na Eletroquímica, pois representa a quantidade de eletricidade capaz de eletrólisar um Equivalente-grama (E) de qualquer substância, sendo que o Faraday (F) também representa a carga elétrica de 1 mol ( $6,02 \times 10^{23}$ ) de elétrons.

### C) PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS

Os efluentes industriais com altas cargas orgânicas figuram entre os poluentes do meio ambiente que mais preocupam, especialmente os sintéticos (juntamente com os despejos de efluentes ricos em metais pesados). A poluição por matérias orgânicas cresce mundialmente, especialmente após o fim da 2ª Guerra Mundial, com a expansão da indústria petroquímica [12].

Os despejos de refinarias de petróleo têm diversas origens, ocorrendo, conforme [5], principalmente:

- Em vazamentos ou derrames dos equipamentos de refrigeração;
- No condensado das operações de retificação dos vapores;
- Águas de lavagem da dessalinização do óleo cru e tratamento de outros subprodutos;

- Em perdas durante a abertura ou fechamento de equipamentos ou válvulas;
- Em esgotamentos de tanques de armazenagem;
- Nas descargas das torres de resfriamento;
- Nos despejos dos condicionadores e equipamentos para limpeza de água;
- Em outras fontes, tais como: água de escoamento das chuvas, águas resultantes da lavagem de áreas ou equipamentos e esgotos domésticos.

Tais fatos explicam, em parte, o porque da presença de uma concentração grande de hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPA), no efluente das estações de tratamento de esgoto (domésticos), mesmo os oriundos das dependências extra-produção das refinarias. Em parte, pois faz-se uma ressalva quanto o caráter errôneo de projeto que prevê a captação conjunta dos efluentes oriundos da produção e os oriundos das dependências extra-produção (pátios, ferramentarias, estocagem, almoxarifados, galpões de serviços, etc.)

As análises laboratoriais para efluentes industriais são ligeiramente diferenciadas das análises dos efluentes puramente domésticos, uma vez que os níveis de toxicidade da água podem, perfeitamente, passar despercebido pelos parâmetros convencionais de caracterização de um esgoto doméstico [11].

Em nosso trabalho procuramos elencar um número de parâmetros bioquímicos que fosse suficiente para a caracterização de um efluente industrial, em nosso caso, de uma indústria petroquímica, combinada a um efluente doméstico comum [3][5].

Os parâmetros bioquímicos escolhidos foram: Amônia,  $\text{DBO}_5^{20}$  (Demanda Bioquímica de Oxigênio), DQO (Demanda Química de Oxigênio), Fósforo, Nitrato, Nitrito, Sulfato e TOC (Carbono Orgânico Total).

Ao passo que os parâmetros físicos escolhidos foram: pH (potencial Hidrognônico), Condutividade, Temperatura e Turbidez.

Por se tratar de um efluente rico em hidrocarbonetos (petroquímicas), a metodologia para o levantamento das propriedades bioquímicas de esgotos domésticos fica bastante próxima da metodologia e dos parâmetros que decidimos utilizar para a caracterização da eficiência do processo eletrolítico.

#### D) PARÂMETROS FÍSICOS

A turbidez é uma característica da água que se deve à presença de partículas em suspensão ou em forma coloidal dispersas no efluente. A presença dessas suspensões provoca a difração e a absorção da luz, dando uma aparência nebulosa e indesejável ao efluente.

Por ser impraticável relacionar a turbidez com a massa de matéria em suspensão, utilizamos a leitura direta em espectrofotômetro referenciada à água deionizada (parâmetro chamado de “branco”), sendo a resposta relativa às Unidades Fotométricas de Turbidez (FTU) [12].

O pH fora mensurado no efluente (antes do processo eletrolítico) e em tempos pré-determinados de detenção da amostra na cuba eletrolítica e, por fim, ao final do processo,

sendo realizada com o peagâmetro, aparelho dotado de um sonda, que imersa na amostra, estima à quantidade de íons hidrogênio da mesma.

A temperatura é fator importante visto que esta tem efeito sobre as reações químicas, acelerando-as ou desacelerando-as, imprimindo maior ou menor solubilidade de gases, propiciando odor, entre outras. É desejável, para a Engenharia Sanitária, que a temperatura de descarte (despejo) do efluente esteja próxima à temperatura ambiente, ou próxima à temperatura do corpo hídrico receptor [13][14].

Realizamos as medidas de temperatura antes e durante o processo da cuba eletrolítica com o auxílio de uma conda de temperatura. A própria resistividade, tanto do material como do efluente, sofre considerável variação com a mudança da temperatura. Em virtude do efeito Joule, há liberação (dissipação) de energia em forma de calor, proveniente da passagem da corrente elétrica pelo elemento resistivo.

A relação entre a resistividade dos metais em geral e a temperatura pode ser considerada, para até uma faixa razoável de variação de temperaturas, como uma função linear, conforme [8]. Portanto, para praticamente todas as aplicações tecnológicas, a relação linear pode ser expressa como sendo:

$$\rho - \rho_0 = \rho_0 \alpha (T - T_0) \quad (11)$$

Onde  $\rho$  é a resistividade do material na temperatura  $T$ ,  $\rho_0$  é a resistividade do material na temperatura  $T_0$  (pode-se tomar a temperatura ambiente ou outra qualquer como referência, por exemplo à  $20^\circ\text{C}$  o alumínio apresenta um  $\rho_0 = 2,75 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$ ) e  $\alpha$  é o coeficiente de temperatura da resistividade (alumínio  $\cong 4,4 \cdot 10^{-3} \text{K}^{-1}$  à  $20^\circ\text{C}$ ).

Para exemplificar a influência da temperatura na determinação da resistividade do material, pode-se aplicar a variação de temperatura entre  $T = 20^\circ\text{C}$  e  $T = 43,7^\circ\text{C}$ , temperatura obtida para um período de detenção do efluente de 120 minutos, conforme o ensaio relatado na tabela 3, à equação (30), onde obteremos um valor de  $\rho$  igual a  $3 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$  para o material dos eletrodos (alumínio), o que representa um aumento da resistividade da ordem de  $\cong 10\%$ .

Este aumento na resistividade intrínseca do material será proporcional e diretamente repassada ao valor do resistor equivalente do circuito da célula eletrolítica, o que resultará num aumento de 10% na potência exigida (dissipada) pelos eletrodos no processo.

Pode-se adotar a mesma abordagem em relação ao efluente, uma vez que os eletrólitos nele presente, o torna um condutor, mais precisamente, um semiconductor. Com o uso do condutivímetro, pode-se medir os parâmetros de resistividade elétrica  $\rho$  e o coeficiente de temperatura da resistividade  $\alpha$ , obtendo-se os seguintes valores respectivamente: efluente  $\rho \cong 6,5 \cdot 10^{-2} \Omega \cdot \text{m}$  a  $25^\circ\text{C}$  e  $\alpha_0 \cong -1,28 \cdot 10^{-2} \text{K}^{-1}$ . Tais valores podem classificar o efluente em questão como um semiconductor, conforme [8].

Para exemplificar a influência da temperatura na determinação da resistividade do efluente, pode-se aplicar a variação de temperatura entre  $T = 25^\circ\text{C}$  e  $T = 43,7^\circ\text{C}$ , temperatura obtida para um período de detenção do efluente

de 120 minutos, conforme o ensaio relatado na tabela 3, à equação (11), onde obteremos um valor de  $\rho$  igual a  $4,9 \cdot 10^{-2} \Omega \cdot m$ , o que representa uma redução da resistividade da ordem de  $\approx 25\%$ .

Esta redução na resistividade intrínseca do material será proporcional e diretamente repassada ao valor do resistor equivalente do circuito da célula eletrolítica, o que resultará numa redução de 25% na potência exigida (dissipada) pelo efluente no processo.

A condutividade elétrica depende, essencialmente, dos sais em dissolução no efluente, e é aproximadamente proporcional à sua quantidade, o que se mostra um fator positivo, permitindo uma redução do consumo de energia, conforme demonstrado pela aplicação da equação 11 para o caso do efluente de características semi-condutivas.

Outra aplicação versátil do condutivímetro é rápida estimativa do conteúdo de sólidos de uma amostra.

Para a condutividade, que a exemplo da temperatura e o pH, utilizamos um condutivímetro cuja sonda mergulhada na amostra, faz a contagem de íons condutores.

### III. MONTAGEM EXPERIMENTAL

Os aparelhos de alimentação da cuba eletrolítica, as fontes, fornecem a corrente que é aplicada às placas (eletrodos), que são conduzidos por diversas ligações efetuadas com cabos do tipo “banana-jacaré”. Os cabos interligam as fontes, o circuito reversor controlador de polaridade e os eletrodos (placas) da cuba.

Desenvolveu-se um circuito para permitir a inversão polar temporizada, que funcionava sob o comando de um software, manipulável através de um microcomputador, conforme fig. 2 e fig.3.



Figura 2: Interface do software de comando do circuito temporizado de inversão polar

A leitura da intensidade da corrente ( $i$ ) e da diferença de potencial ( $V$ ), são tomadas através de dois multímetros ligados diretamente ao circuito de alimentação da célula eletrolítica.

Os parâmetros químicos e bioquímicos a serem analisados, para a determinação da eficiência do processo eletrolítico de tratamento destes efluentes, são: amônia (mg/l); DBO<sub>5</sub> [Demanda Biológica de Oxigênio – para 5 dias à 20° C] (mg/l), DQO [Demanda Química de Oxigênio] (mg/l); Fósforo (mg/l); Nitrato (mg/l); Nitrito (mg/l); Sulfato (mg/l) T.O.C.[Carbono Orgânico Total] (mg/l); e Turbidez (FTU) [15].

Os procedimentos de análise química para a determinação de alguns dos acima citados parâmetros de classificação da água de efluente são, basicamente, realizados com o auxílio de um Espectrofotômetro e, os demais, através de métodos de química analítica elencados no Standard Methods[15].

Tomou-se o devido cuidado para não comprometer a veracidade das amostras coletas, realizando-se as análises nos tempos e metodologias de preservação preconizados na bibliografia, mesmo as amostras que necessitassem serem preservadas para análise numa data posterior .

Os ensaios realizados, conforme, com o conjunto completo em funcionamento fig. 3, mostrou-se de fácil manipulação e montagem, conforme o programado. O efluente utilizado foi da estação receptadora de efluentes da Refinaria Presidente Bernardes de Cubatão – RPBC, sendo que amostras do efluente *in natura* (estado inicial) eram coletados e seus parâmetros químicos/bioquímicos e físicos levantados, para permitir futura comparação com o efluente “eletrolisado” (estado final após eletrólise), em tempos especificados de detenção do mesmo na cuba eletrolítica.



Figura – 3: Foto da Cuba Eletrolítica em funcionamento, a saber: as sondas de temperatura, pH e Condutividade, o circuito reversor temporizado de polaridade, as fontes de alimentação, os multímetros e o microcomputador controlador.

Quanto aos dados, podemos dividi-los em: parâmetros físicos, levantados simultaneamente durante o processo eletrolítico (tabela 1) e os parâmetros químicos e físico-químicos obtidos com a tomada de amostras (em cada batelada) e sua posterior análise, em tempos pré-determinados de detenção (tabela 2).

Tempo [min]	Temperatura [°C]	PH	Condutividade [ $\mu\text{S}/\text{cm}^2$ ]	Intensidade da corrente [A]	Voltagem [V]
0	25,0	6,74	1557	6,000	12,20
10	27,0	8,63	1596	6,100	12,60
20	29,6	9,20	1632	6,200	13,10
30	31,0	9,30	1656	6,300	13,54
60	39,0	8,70	1818	6,271	12,94
120	43,7	8,95	1966	6,200	12,12

Tempo [min]	Amônia [mg/l]	DBO <sub>5</sub> [mg/l]	DQO [mg/l]	Fósforo [mg/l]
0	0,58	26,0	66	9,8
10	3,24		51	0,6
20	3,01		37	0,4
30	3,03		35	0,2
60	4,38		30	0,5
Nitrato [mg/l]	Nitrito [mg/l]	Sulfato [mg/l]	TOC [mg/l]	Turbidez (FTU)
2,57	0,336	60,0	314,0	21
0,02	0,336	54,0		16
0,10	0,329	51,0		21
0,68	0,260	48,0		10
1,65	0,296	28,0	16,0	8
1,62	0,336	32,0		8

#### IV. CONCLUSÃO

Através dos quatro ensaios (bateladas) realizados, verificamos que houve considerável diferença entre as potências dissipadas, em virtude das diferentes intensidades de corrente e diferenças de potencial, propositadamente estabelecidas, a fim de relacionar-mos graus de eficiência em função das intensidades dos parâmetros elétricos.

Conforme pode ser visto na tabela 3, o último ensaio realizado mostrou ser o que mais dissipou energia, entretanto o de maior eficiência nos parâmetros bioquímicos de caracterização do efluente. É importante destacar, entretanto, que se poderia encontrar um ponto de concordância entre a eficiência e o consumo de energia

	Intensidade de corrente (média) [A].	Diferença de potencial (média) [V]	Potência dissipada no experimento [Wh]	Potência dissipada por m <sup>3</sup> [KWh/m <sup>3</sup> ]
Ex. 1	2,750	6,430	17,680	3,537
Ex. 2	1,471	4,090	5,561	11,122
Ex. 3	2,270	1,740	3,950	7,800
Ex. 4	6,220	12,561	78,120	15,624

As medidas dos parâmetros químicos e físico-químicos do processo, para este ensaio, indicam a mais alta eficiência dentre os ensaios já realizados. Verificamos que a DBO<sub>5</sub><sup>20°C</sup> reduziu-se, em média, cerca de 85%, a DQO também apresentou um bom resultando, reduzindo-se cerca de 64% e fósforo 92%.

Para o Nitrato, o comportamento parece possuir um padrão, uma vez que nos primeiros minutos há uma queda exponencial (99%) e depois começa a subir, provavelmente em virtude da ruptura de aminoácidos e cadeias protéicas existente no efluente, no decorrer do processo eletrolítico, conforme concluído, também, por [6]. Após a acentuada queda, alcança cerca de 40% (em relação ao valor inicial) ao fim de 90 minutos de tempo de detenção.

O Sulfato apresentou queda da ordem de 50% e o Carbono orgânico Total (COD/TOC) a redução foi ainda mais expressiva, cerca de 95%. A concentração de Amônia cresceu, a exemplo dos ensaios anteriores, alcançando cerca de 10 vezes a concentração inicial, a despeito da alta intensidade de corrente e diferença de potencial.

O fato é compreensível, tendo em vista que grande parte do material orgânico de cadeias moleculares maiores foi “desmembrado” pela presença do campo elétrico, cuja voltagem aplicada (tabela 3) foi muito grande, tanto o TOC como a DBO e a DQO comprovam essa premissa, liberando, na cuba, amônia, água e gás carbônico, entre outros[6].

Fato que não ocorreria se fossem utilizados eletrodos de outro tipo de material e com a aplicação de uma voltagem menor, conforme [5]

Quanto à turbidez, a própria avaliação visual do efluente final foi corroborada pela análise espectrofotométrica.

Caso o processo eletrolítico faça parte de uma “planta” de tratamento de efluentes, associado a outros processos biológicos, a redução da carga orgânica proporcionada pela eletrólise (cerca de 85% na DBO), acarretará uma substancial redução de espaço físico necessário ao dimensionamento das unidades biológicas de tratamento.

No caso de um filtro biológico, por exemplo, a redução do volume necessário, será diretamente proporcional, conforme demonstrado por [16], através de (12):

$$\frac{DBO \cdot Q \cdot 10^{-3}}{V} = \frac{0,15 \cdot DBO \cdot Q \cdot 10^{-3}}{V'}$$

$$V' = 0,15 \cdot V \quad (12)$$

Onde DBO é a Demanda Biológica de Oxigênio efluente ao filtro, Q é a vazão efluente, V é o volume do meio filtrante inicial e V' é o volume do meio filtrante final.

Redução semelhante pode ser obtida no caso da área de uma lagoa de estabilização. Usando-se o critério de Gloyna, conforme [16] e mantendo-se a mesma taxa de descarga, a redução da área da lagoa de estabilização, será conforme a equação 13, também da ordem de 85%:

$$\frac{Carga \ de \ DBO \cdot t}{A} = \frac{0,15 \cdot Carga \ de \ DBO \cdot t}{A'}$$

$$A' = 0,15 \cdot A \quad (13)$$

Onde Carga de DBO, é a carga orgânica efluente à lagoa, t é o tempo de detenção, A é a área ocupada pela lagoa de estabilização sem o tratamento eletrolítico e A' é a área ocupada pela lagoa de estabilização com o tratamento eletrolítico.

Para o balanço de matéria orgânica de um reator de lodo ativado, a redução volumétrica, mantendo-se o rendimento,

será proporcional à redução do tempo de detenção, conforme à seguir (14)[16]:

$$t' = t / 6,67 \cdot \delta \quad (14)$$

$$Q = V \cdot t \quad (15)$$

Onde  $t$  é o tempo de detenção do efluente sem o tratamento eletrolítico,  $t'$  é o tempo de detenção do efluente com o tratamento eletrolítico,  $\delta$  é um coeficiente para a redução do material volátil em suspensão que a eletrólise proporcionará,  $Q$  é a vazão efluente e  $V$  é o volume do tanque.

Como se verifica na equação 14, o novo tempo de detenção do efluente fica reduzido significativamente com a diminuição da carga de entrada em cerca de 85%.

Mantendo-se o mesmo tempo de detenção, entretanto, poder-se-á reduzir o volume do reator também em 85%, conforme explicita a equação 15.

A área e volumes exigidos para a implantação do sistema de tratamento biológico convencional (lagoas de estabilização, lodos ativados, lagoas aeradas, biodigestores, filtros biológicos, etc.) pode ser, conseqüentemente, reduzidos pela adoção do processo eletrolítico.

Embora haja necessidade de uma implementação em escala piloto para uma análise mais detalhada da relação custo/benefício, do comportamento num regime hidrodinâmico e as implicações biológicas à jusante do processo, a viabilidade parece ser respaldada pelos resultados experimentais expostos.

## V REFERÊNCIAS

[1] Lei Federal nº 9605/98 de 12 de Fevereiro de 1998, publicado no DOU de 13 de Fevereiro de 1998. Seção III, Artigo 54, § 2º e Constituição do Estado de São Paulo no seu Título VI, Capítulo IV, Seção II Artigo 208.  
[2] Botari, A.; Pessoa A. S. A.; Politi, J.; Souza, L. F. de; BRITO, C. da R. "Células Eletrolíticas para Tratamento de Efluentes Aplicadas à Edificações de Pequeno e Médio Portes", In: Simpósio de Iniciação Científica da Universidade de São Paulo, 6., São Carlos, 1998. Anais do VI Simpósio de Iniciação Científica da Universidade de São Paulo. São Carlos: USP, 1998. p. 32.

[3] Botari, A.; Pessoa A. S. A.; Politi, J.; Souza, L. F. de; BRITO, C. da R. "Estação Eletrolítica de Tratamento de Esgoto Residencial", In: Simpósio de Iniciação Científica, 2., Marília, 1998. Anais do II Simpósio de Iniciação Científica. Marília: UNIMAR, 1998. p. 57.  
[4] Botari, A.; Brito, C. da R. "Controlador Temporizado de Polaridade e Potência", In: Workshop de Iniciação Científica e Tecnológica da Faculdade de Engenharia da Universidade Católica de Santos, 2., Santos, 1998. Anais do II Workshop de Iniciação Científica da Faculdade de Engenharia da Universidade Católica de Santos. Santos: UNISANTOS, 1998. P.1.  
[5] Moraes, P. B. DE. "Aplicação do Processo Eletrolítico em Efluente de Refinaria de Petróleo e Efluente Simulado Utilizando Eletrodos de Ti/TiRuO<sub>2</sub> e Eletrodos de Ferro Fundido", in Dissertação de Mestrado do Instituto de Geociências e Ciências Exatas da Universidade Estadual Paulista – UNESP, UNESP – Rio Claro, 2000.  
[6] Athanasopoulos, N. S.. "Use of Various Processes for Pilot Plant of Wastewater from a Wood-Processing Factory", in: Journal of Chemical Technology & Biotechnology, U.S.A., 2001. Journal of Chemical Technology & Biotechnology. U.S.A., 76 Volume, Issue 3, 2001. p.245-250.  
[7] Sobrinho, P. A. ; Zimbardi, W. "Tratamento de Esgoto de Áreas Litorâneas por Processo Eletrolítico", Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 14., São Paulo, 1987. Anais do XIV Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. São Paulo, 1987. p. 136.  
[8] Halliday, D., Resnick, R. Fundamentos de Física, vols. 2 e 3. Eletricidade e Eletromagnetismo. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos (1991).  
[9] Nussenzveig, H. M. Curso de Física Básica, vol 3. Eletromagnetismo. São Paulo: Editora Edgard Blucher Ltda. (1997).  
[10] Russel, J. B. Química Geral. São Paulo: Mc Graw-Hill, 2 º Edição - 1994.  
[11] Feltre, Ricardo. Química. Editora Moderna, São Paulo: (1984).  
[12] Braille, P. M.; Cavalcanti, J. E. W. A. Manual de Tratamento de águas Residuárias Industriais. São Paulo: Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental São Paulo – Brasil/CETESB (1993).  
[13] Branco, S. M. Hidrologia Aplicada à Engenharia Sanitária. São Paulo: Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental São Paulo – Brasil/CETESB (1986).  
[14] Branco, c. w. c.; Arroio, I. A. "Recuperação de Sistemas de Lodos Ativados para Efluentes de Coquerias e Determinação da Sucessão Biológica no Lodo", Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 14., São Paulo, 1987. Anais do XIV Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. São Paulo, 1987. p. 429.  
[15] Clesceri, L. S.; Greenberg, A. E.; Eaton, A. D.. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. Baltimore, U.S.A. (1998)  
[16] Pessoa, C. A.; Jordão, E. P. Tratamento de Esgotos Domésticos, Vol.I. Rio de Janeiro: Editora: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária – ABES, 1982.