



I-055 - O PROCESSO ELETROLÍTICO APLICADO AO SANEAMENTO AMBIENTAL DE BALNEÁRIOS

Gandhi Giordano⁽¹⁾

Engenheiro Químico pela Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), Especializado em Engenharia Sanitária e Ambiental pela UERJ. M.Sc. em Ciência Ambiental - PGCA/UFF, em Doutorado no Depto de Metalurgia e Materiais - PUC-Rio. Prof. Assistente no Depto de Engenharia Sanitária e do Meio Ambiente da FEN/UERJ e Diretor Técnico da Tecma Tecnologia em Meio Ambiente Ltda.

Olavo Barbosa Filho

Engenheiro Químico - FAAP/SP. M.Sc. em Eng. Metalúrgica - PUC - Rio. Ph.D. em Hidrometalurgia - Imperial College, University of London, UK. Prof. Adjunto no Depto. de Engenharia Sanitária e do Meio Ambiente da FEN/UERJ.

FOTOGRAFIA
NÃO
DISPONÍVEL

Endereço⁽¹⁾: Rua Riviera, 28 - Jacaré - Rio de Janeiro - RJ - CEP: 20975-050 - Brasil - Tel: (21) 501-3315 - Fax: (21) 201-3956 - e-mail: tecma01@tecma-tecnologia.com.br

RESUMO

Os balneários possuem características muito peculiares quando comparados com outras áreas de ocupação urbana. Dentre estas peculiaridades destaca-se a sazonalidade das atividades turísticas e como conseqüência a considerável flutuação populacional.

Idealmente a infra-estrutura dos serviços de saneamento e saúde pública de um balneário deveria ser capaz de absorver os impactos decorrentes destes aumentos populacionais transitórios, sem comprometer a qualidade ambiental e a da saúde das populações envolvidas.

A realidade observada nos balneários brasileiros é basicamente diferente daquela que seria ideal. O grande aumento observado nos últimos anos das atividades turísticas associado à acelerada expansão imobiliária nas áreas afetadas, conduziu a situações bastante precárias em termos de desenvolvimento urbano, de saúde pública e da proteção meio ambiente.

Esta realidade dos balneários brasileiros motivou o presente trabalho, que procura abordar estas questões a partir da realidade encontrada no município de Armação de Búzios, no litoral norte do Estado do Rio de Janeiro.

A flutuação de população dificulta, ou mesmo, inviabiliza, a utilização de métodos convencionais de tratamento (biológicos) que requerem uma relativa equalização das vazões afluentes às estações de tratamento. O processo eletrolítico com uma estrutura modular permite a flexibilidade operacional que vai ao encontro destas características de sazonalidade dos balneários.

O programa experimental realizado com amostras típicas dos esgotos de Armação dos Búzios tratadas em laboratório pelo processo eletrolítico produziu resultados que indicam ser este processo uma alternativa viável para o tratamento de esgotos nos balneários. Foram obtidas eficiências de redução de DBO acima de 85%, da DQO acima de 90% e do fósforo sempre superiores a 85%.

As reduzidas áreas necessárias possibilitam as instalações das ETE's próximas à vizinhança e dos postos geradores de esgoto, com baixos custos para a implantação de redes coletoras de esgotos, ou seja, reduzindo significativamente os custos de todo o sistema de esgotamento sanitário.

PALAVRAS-CHAVE: Eletrolítico, Eletrocoagulação, Esgotos, Balneários, Fósforo.

INTRODUÇÃO

Um dos grandes problemas ambientais observados atualmente no Brasil diz respeito aos balneários. A gravidade da situação e as repercussões para a indústria turística do país tem motivando um certo grau de mobilização de esforços como o observado no recente encontro denominado "Turismo e Saneamento Ambiental", promovido pelo Ministério de Esportes e Turismo em Florianópolis no mês de novembro de 1999.

Os balneários possuem características muito peculiares quando comparados com outras áreas de ocupação urbana. Dentre estas peculiaridades destaca-se a sazonalidade das atividades turísticas e como conseqüência a considerável flutuação populacional. Há uma grande disparidade entre a chamada população fixa e a



população flutuante, que chega a números várias vezes maiores durante as estações de veraneio do que aquele da população fixa. No caso particular do município de Armação dos Búzios a flutuação é superior a 5 vezes (FEEMA,1988). Além desta flutuação populacional verificada entre a alta e a baixa estação, verifica-se também, uma flutuação mais ou menos crônica, em feriados e finais de semana.

Idealmente a infra-estrutura dos serviços de saneamento e saúde pública de um balneário deveria ser capaz de absorver os impactos decorrentes destes aumentos populacionais transitórios, sem comprometer a qualidade ambiental e a da saúde das populações envolvidas.

Em outras palavras a infra-estrutura de um balneário deveria ser super dimensionada (em relação a sua população fixa) de modo a atender às demandas de pico durante as épocas de veraneio.

Além do super dimensionamento, tal infra-estrutura deveria ter flexibilidade para acompanhar os aumentos e diminuições de população sem perder a capacidade operacional e sem envolver custos desnecessários.

A realidade observada nos balneários brasileiros é basicamente diferente daquela que seria ideal. O grande aumento observado nos últimos anos das atividades turísticas associado à acelerada expansão imobiliária nas áreas afetadas, conduziu a situações bastante precárias em termos de desenvolvimento urbano, de saúde pública e da proteção ao meio ambiente. O que se observa é uma ocupação desordenada do solo e índices preocupantes de poluição das águas, bem como uma acelerada degradação dos ecossistemas costeiros.

Esta realidade dos balneários brasileiros motivou o presente trabalho, que procura abordar estas questões a partir da realidade encontrada no município de Armação de Búzios, no litoral norte do Estado do Rio de Janeiro.

O trabalho se inicia com uma avaliação ambiental do município a qual converge à identificação dos principais impactos ambientais verificados.

A partir desta identificação, procura-se desenvolver uma alternativa para o controle de poluição hídrica por ser este, sem dúvida, o mais premente dentre os problemas observados.

A alternativa considerada visa ao tratamento de esgotos utilizando o processo eletrolítico. As razões para a escolha deste processo residem na sua perfeita adequação às características de sazonalidade dos balneários, acima mencionadas. De fato, o processo eletrolítico pode ser operado de forma intermitente sem qualquer prejuízo de desempenho e pode ser construído modularmente. As estações de tratamento que utilizam este processo ocupam áreas relativamente pequenas se comparadas com as áreas requeridas pelos tratamentos biológicos convencionais.

CARACTERÍSTICAS AMBIENTAIS DOS BALNEÁRIOS

USO DO SOLO E OCUPAÇÃO URBANA

O desenvolvimento dos balneários é movido pelo desejo da população em obter um local prazeroso, livre das limitações que o espaço urbano de origem lhe impõe, sendo esquecidas as obrigações legais. São ocupadas áreas de marinha, brejos e mangues são aterrados, sítios arqueológicos são destruídos (Sambaquis), falésias, costões rochosos e areias das praias. A falta de planos diretores permite uma taxa de ocupação dos terrenos superior as das cidades de origem acentuando assim as condições para a flutuação de população. A ocupação desenfreada do solo, com infra-estrutura inexistente ou deficiente, incentiva as soluções precárias, tais como sépticas e sumidouros e a utilização de poços do lençol freático ou carros pipa para o abastecimento de água.

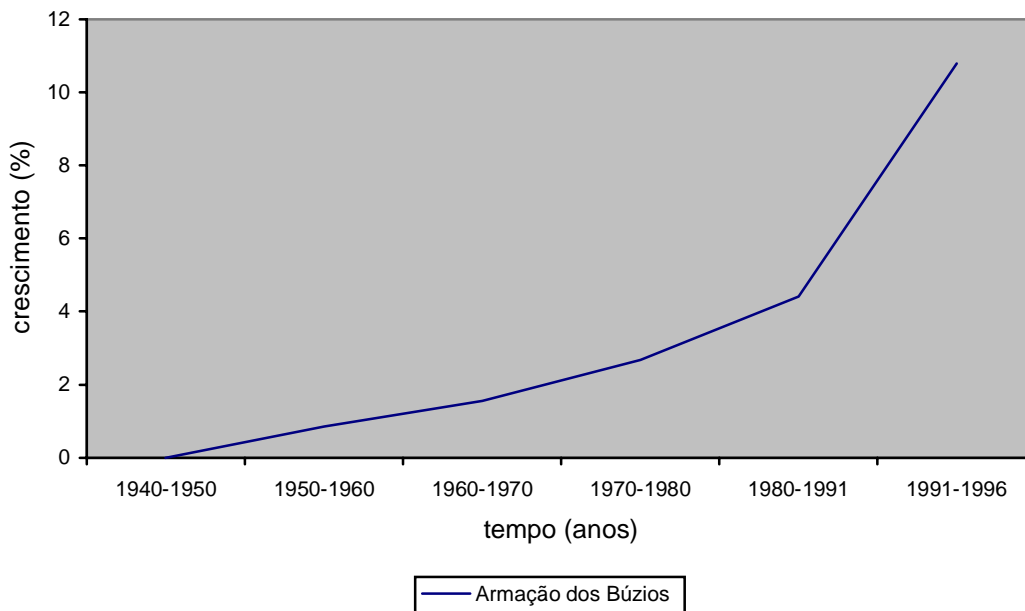
POPULAÇÃO

A mais importante característica dos balneários é a flutuação de população. A seguir descrevemos como estudo de caso as características populacionais de Armação dos Búzios, importante balneário brasileiro. Nos períodos de veraneio a população atinge valores extremamente elevados chegando, no caso de Armação dos Búzios, a 5 vezes a população fixa (FEEMA,1988). Esta, por sua vez, tem sofrido considerável aumento ao longo dos últimos anos.



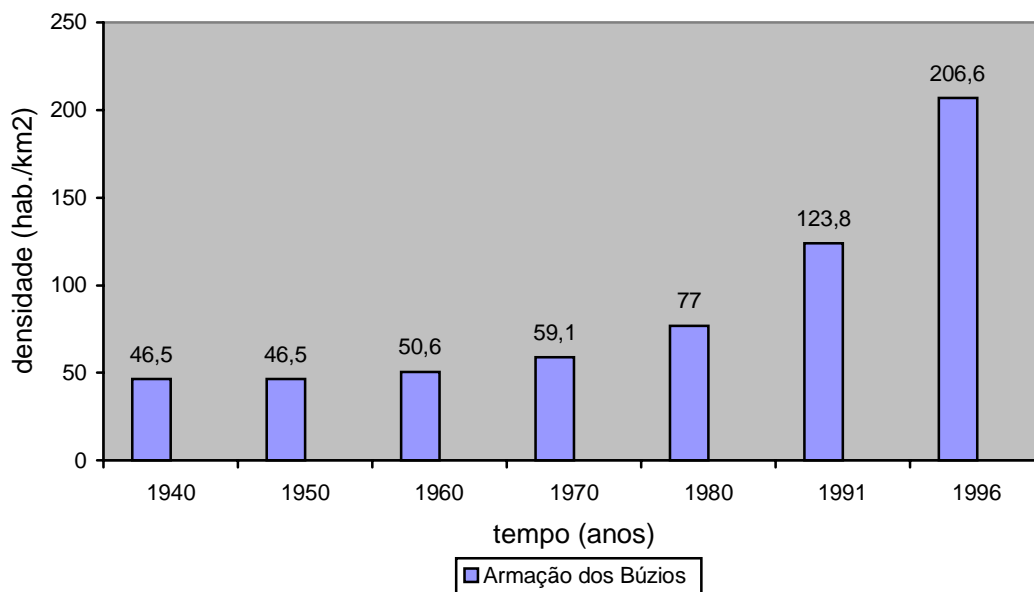
A população fixa, segundo o último censo demográfico realizado em 1991, era de 8.604 habitantes. Segundo estimativas do Governo do Estado do Rio Janeiro, a população fixa atual (1999) é de 19.154 habitantes (CIDE, 1997). Um dos fatores de crescimento foi sem dúvida o movimento pela emancipação do município que despertou o interesse por investimentos na região e pela imigração. As taxas de crescimento populacional podem ser verificadas na figura 1 (CIDE,1997).

Figura 1 - Taxa de Crescimento Populacional



A taxa de urbanização da população residente de Armação dos Búzios cresceu substancialmente a partir dos anos 70. Atualmente toda a população reside na zona urbana do município. O grande crescimento da população foi coincidente com o movimento pela emancipação do município. A urbanização também teve crescimento acentuado indicando mais uma vez a vocação econômica para o setor de serviços, podendo-se observar as taxas de urbanização na Figura 2.

Figura 3-Densidade Demográfica





A flutuação da população em estações balneárias é uma característica peculiar, ocorrendo principalmente nos feriados e fins de semana e principalmente no verão, sendo esta variação superior a cinco vezes a população fixa (FEEMA, 1988, p.25). Devido às flutuações econômicas de câmbio ocorrem diversas ondas turísticas nos balneários brasileiros pelos turistas principalmente argentinos e uruguaios, que preferem as praias do litoral sul. No litoral nordeste temos os turistas brasileiros e estrangeiros. As festas religiosas e folclóricas além de festivais e parques temáticos são também fatores agregadores de estímulos ao turismo em balneários.

No fim do ano de 1997, as autoridades locais de Armação dos Búzios solicitaram através de todos os meios de comunicação que ninguém mais se dirigisse ao balneário pois o mesmo encontrava-se superlotado, não dispondo de infra-estrutura para os turistas.

INFRA-ESTRUTURA DE SANEAMENTO

O ABASTECIMENTO DE ÁGUA

A precariedade dos sistemas de abastecimento de água potável nas regiões balneárias é um ponto comum, visto que com o baixo consumo nas baixas estações o sistema não se viabiliza economicamente.

Foi inaugurada no início de 1999 uma adutora que utiliza o manancial de Juturnaíba. Mesmo após a inauguração da adutora, a água ainda não tem sido distribuída conforme as necessidades da população devido à insuficiência da rede de distribuição de água, fato agravado pelo grande crescimento populacional e da taxa de urbanização na última década.

Não existe água potável para suprir toda a demanda da alta estação. O abastecimento é realizado por caminhões-pipa, que nem sempre fornecem água da CEDAE (água potável), conforme informações obtidas da Secretaria Municipal de Meio Ambiente. A estimativa da prefeitura local é de que mais de 300 caminhões-pipa, abasteçam Armação dos Búzios no verão. O tráfego destes caminhões tumultua o trânsito, deteriora a pavimentação e tem sido responsável por diversos casos de atropelamento.

A alternativa existente para a população é a utilização de poços freáticos, denominados “furos”, que normalmente apresentam água salobra e ou contaminada por esgotos.

Existem também alguns pequenos sistemas que utilizam o processo de osmose reversa para a dessalinização de água do mar, em alguns hotéis ou pousadas em Armação dos Búzios.

O ESGOTAMENTO SANITÁRIO

Em Armação dos Búzios existe uma rede coletora instalada na área central do município, que tem capacidade para atender a aproximadamente 3.000 habitantes. Esta rede coletora não dispõe de tratamento, sendo os esgotos coletados lançados na praia dos ossos.

No bairro de Cem Braças está sendo construída uma rede coletora de esgotos sanitários para atender a uma população de 1.500 habitantes, dotada de estação de tratamento de esgotos pelo processo eletrolítico, que encontra-se em fase de pré-operação. As obras são uma iniciativa da prefeitura municipal.

Os empreendimentos imobiliários isolados lançam esgotos *in natura* nos córregos, riachos, brejos, manguezais e mesmo em algumas praias.

Alguns empreendimentos imobiliários possuem estações de tratamento de esgotos pelos processos biológicos aeróbios ou anaeróbios, porém todas fora de operação ou apenas ligados, mas sem nenhum controle operacional. A causa principal apontada pelos próprios usuários é a variação de carga orgânica brusca, causada pela flutuação da população no balneário. Nos hotéis, segundo informações de gerentes, o consumo de água varia na razão de 1 para 5, entre os períodos de baixa e alta estação.

As fossas sépticas também são utilizadas associadas a sumidouros. Existem também os “buracos negros”, estruturas precárias confundidas com fossas sépticas.



A limpeza das fossas é realizada por caminhões limpa-fossas, descarregados em locais desconhecidos (normalmente beira de estradas), pois na região não existem estações de tratamento de esgotos.

Em outros balneários é também normal a presença de valas negras escoando até as praias sendo suas principais fontes de contaminação.

A ausência de programas de monitoramento muitas vezes aliena a população de turistas e a local da verdadeira qualidade das águas em relação à balneabilidade.

PROBLEMAS ENCONTRADOS PELOS MÉTODOS CONVENCIONAIS DE TRATAMENTO DE ESGOTO PARA BALNEÁRIOS.

Os processos biológicos reproduzem em uma escala de tempo e área os fenômenos de autodepuração que ocorrem na natureza.

Os tratamentos biológicos de esgotos têm como objetivo remover a matéria orgânica dissolvida e em suspensão, através da transformação desta em sólidos sedimentáveis (flocos biológicos), ou gases (RAMALHO, 1991).

Os produtos formados devem ser mais estáveis, tendo os esgotos tratados um aspecto mais claro, significativa redução da presença de microorganismos e menor concentração de matéria orgânica.

Os processos de tratamento biológicos têm como princípio utilizar a matéria orgânica dissolvida ou em suspensão como substrato para microorganismos tais como bactérias, fungos e protozoários, que a transformam em gases, água e novos microorganismos.

Os microorganismos, através de mecanismos de produção de exopolímeros (GRADY Jr e LIN., 1980), formam flocos biológicos mais densos que a massa líquida, da qual separam-se com facilidade.

A fração da matéria orgânica transformada em sólidos, situa-se na faixa de 6 a 60% (GRADY Jr e LIN, 1980), dependendo de diversos fatores, tais como, o processo adotado e a relação alimento / microorganismos (A/M). A outra parte da matéria orgânica é transformada em gases, notadamente o gás carbônico nos processos aeróbios e gás carbônico e metano nos sistemas anaeróbios.

É neste ponto, em relação A/M, que a flutuação de população inviabiliza a utilização dos processos biológicos de tratamento.

Os flocos biológicos em excesso, chamados de excesso de lodo, são retirados dos sistemas de tratamento e submetidos a processos de secagem natural ou mecanizada.

Os esgotos clarificados devido à remoção da matéria orgânica em suspensão (coloidal ou sedimentável) e dissolvida, bem como pela redução da presença de microorganismos, é considerado tratado. O grau de tratamento requerido é função da legislação ambiental, ou seja das características ou pelo uso preponderante atribuído ao corpo receptor.

Na tabela 4 estão apresentados os resultados de um estudo comparativo por níveis de tratamento e quanto à natureza dos poluentes, envolvendo eficiências de remoção em relação aos parâmetros representativos da matéria orgânica, dos nutrientes (nitrogênio e fósforo), de microorganismos (colimetria), e relativos a custo, potência instalada, área necessária e quantidade de lodo gerado.

**Tabela 1 - Eficiência dos processos e custos comparativos por níveis de tratamento**

Sistema de Tratamento	Eficiência na Remoção (%)				Requisitos			Quantidade lodo gerado (kg/hab.ano)
	Matéria Orgânica	Nitrogênio	Fósforo	Coliformes	Área (m ² /hab.)	Potência (W/hab.)	Custo (R\$/hab)	
TRATAMENTO PRELIMINAR								
Grade, caixa de areia, peneiras	0-5	0	0	0	<0,001	0,2	13	-
TRATAMENTO PRIMÁRIO								
Decantação e digestão de lodo	25-40	5	10	40-60	1	0,5-1	120	10
Coagulação química e decantação	<75	30-50	90-95	95-99	0,5-1	0,5-1	100	
TRATAMENTO SECUNDÁRIO								
Biocontactores	80-95	70-80	<75	<75	0,15	3	200	2
Lagoa fotossintética	80-95	30-50	<75	95	3,00	0	30-50	1-2
Lodos ativados aeração prolongada	90-95	70-80	70	85-95	0,3	3-4,5	180	4
Eletrocoagulação	85-90	<30	75-95	98-99	0,16	0,2-0,4	120	25-45
TRATAMENTO TERCIÁRIO								
Zona de Raízes	90	70-90	70-90	90	2	0	100	45
Membranas (ultrafiltração)	10	10	30	100	0,05	8	120	0
Radiação Ultravioleta	0	0	0	90	0,01	0,1	10	0

Dados obtidos no acervo técnico da TECMA - Tecnologia em Meio Ambiente Ltda, no ano de 1999, referentes a sistemas de tratamento dimensionados para população equivalente a 1500 habitantes.

Os custos estão corrigidos para setembro de 1999.

Para os processos de tratamento que produzem lodo, foi considerada a secagem natural com leitos de secagem.



TRATAMENTO ELETROLÍTICO COMO ALTERNATIVA AOS PROCESSOS CONVENCIONAIS

VANTAGENS E LIMITAÇÕES DO PROCESSO ELETROLÍTICO

O processo eletrolítico possui algumas vantagens, sendo que a mais importante, que se constitui em objeto desta dissertação, é a capacidade de admitir variações de vazão, pois o sistema opera de forma contínua ou intermitente (WIENDL, 1998, p. 303) e (SOBRINHO et.al., 1987, p. 137). As variações de vazão de esgotos sanitários ocorrem nas regiões balneárias devido à grande flutuação de população, que ocorre nestas regiões entre as estações quentes e frias.

Uma outra vantagem é a reduzida área necessária para a implantação das estações de tratamento de esgotos pelo processo eletrolítico, em função do pequeno tempo de retenção na câmara de eletrocoagulação em comparação com os processos biológicos (WIENDL, 1998).

Dentre as características do tratamento eletrolítico, podem ser destacadas sua alta eficiência em relação à remoção de coliformes, superior a dos outros processos e a alta qualidade organoléptica, ou seja: baixa turbidez, reduzida cor e ausência de odor são características dos esgotos tratados pelo processo de tratamento eletrolítico (WIENDL, 1998, p. 361 e p. 278-280).

O reduzido custo de implantação devido ao menor volume de obras civis, a ausência de ruídos dos equipamentos de processo, ausência de aerossóis, e a concepção modular, estimulam a utilização do processo (WIENDL, 1998).

Como limitações do processo eletrolítico pode-se indicar estes quatro maiores pontos que devem ser considerados ao ser analisada a aplicabilidade do processo em uma região:

- consumo dos eletrodos normalmente de aço carbono ou alumínio e a operação de troca;
- a necessidade de suporte para a manutenção eletromecânica, não devendo ser implantado em áreas de difícil acesso;
- a maior produção de lodo se comparado com os processos biológicos;
- A necessidade de um maior controle operacional.

FENÔMENOS ASSOCIADOS COM O PROCESSO ELETROLÍTICO

A ELETRÓLISE

Quando a dois eletrodos submersos em uma solução contendo eletrólitos, aplica-se uma diferença de potencial (FULLER, 1992, apud SIFUENTES, 1992, p. 30), normalmente na faixa inferior a 10 V, observam-se reações químicas nas superfícies dos eletrodos, sendo estes fenômenos associados denominados eletrólise. Através de duas leis estabelecidas por Faraday, o consumo de eletricidade é associado à quantidade total de substâncias reagidas, o que inclui o desgaste do eletrodo (corrosão) no processo da eletrólise. As leis de Faraday (RUSSEL, 1994, p. 892) são assim enunciadas:

A 1ª lei - “A quantidade de substâncias produzidas pela eletrólise é proporcional à quantidade de eletricidade utilizada”.

A 2ª lei - “Para uma dada quantidade de eletricidade, a quantidade de substâncias produzidas é proporcional ao equivalente-grama do material do eletrodo”.

A passagem da corrente elétrica por uma solução contendo eletrólitos ocorre do eletrodo positivo, denominado cátodo, para o eletrodo negativo, denominado anodo. A concentração dos eletrólitos, a sua composição química, e o número de oxidação de seus íons são responsáveis pela sua condutividade específica, que é diretamente proporcional à facilidade da passagem da corrente ou condutância da solução eletrolítica ($\mu\text{S}/\text{cm}$).

O controle do consumo do material dos eletrodos é fundamental, pois é o item de maior importância para o custo operacional. Considerando que:

1 Mol e^- = 1 Faraday (F)

1 F = $9,6487 \times 10^4$ Coulomb (C)

1 C/s = 1 Ampère (A)



A massa de eletrodo perdida (M.E.P.), pode ser calculada pela seguinte fórmula:

$$M.E.P = nA \times t \times Ma / 9,6487 \times 10^4 \times Ne^-$$

onde:

nA = nº de Ampères

t = tempo de aplicação da corrente (s)

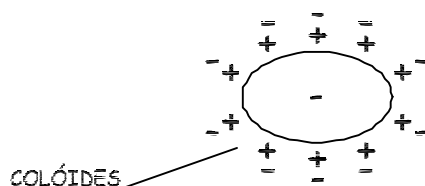
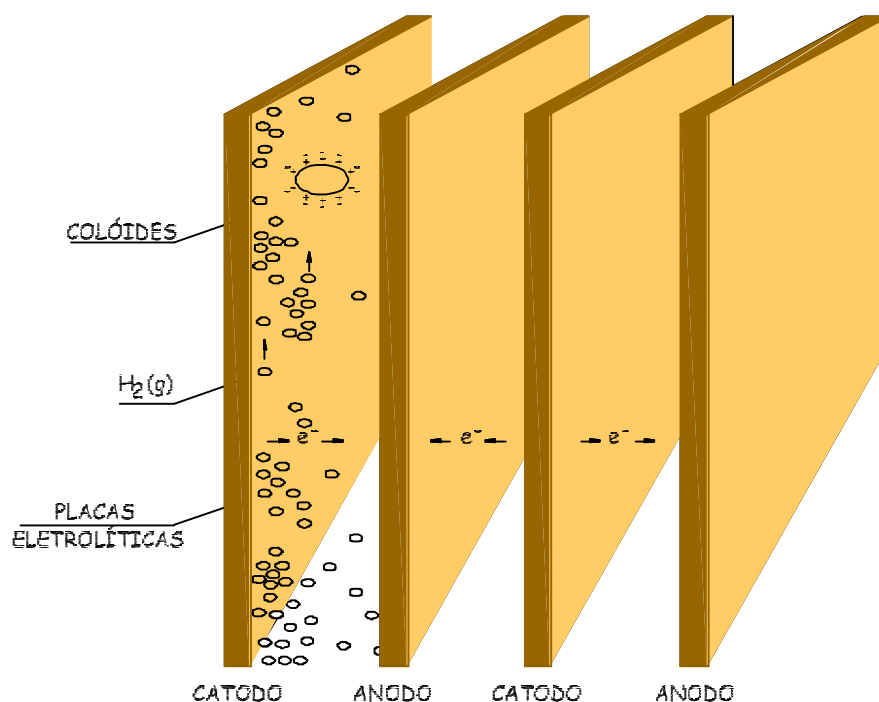
Ma = Massa atômica do elemento predominante do eletrodo (g)

Ne^- = Nº de elétrons envolvidos na reação de oxidação do elemento do cátodo

Se a condutividade da solução é pequena, a resistividade que é o seu inverso propicia um aumento da diferença de potencial entre os eletrodos, aumentando a perda de energia de forma inútil, ou seja, pela dissipação de calor denominada de efeito Joule (QUEIROZ et.al., 1994, p. 5).

A passagem da corrente elétrica é responsável pelas diversas reações que ocorrem no meio: a oxidação de compostos (PULGARIN et.al., 1994); a substituição iônica entre os eletrólitos inorgânicos e os sais orgânicos (YEH et al., 1995), com a conseqüente redução da concentração da matéria orgânica dissolvida na solução e a desestabilização das partículas coloidais por eletrocoagulação. A geração de microbolhas e bolhas finas de hidrogênio no cátodo além da eletroflotação de coágulos e flocos formados pode ser observada na Figura 4.

Figura 4 - Esquema de Placas



Sendo M o material dos eletrodos (GENTIL, 1996).



Anodo:



Cátodo:



A dissolução química de anodos e catodos compreende:



Se a distância entre os eletrodos for muito grande, ocorrerá a perda de energia por dissipação, ocorrendo um aumento da diferença de potencial. Efeito semelhante ocorre se houver depósito de matéria orgânica sobre os eletrodos (principalmente sobre o anodo), ou pela formação de camada de óxidos sobre o cátodo (passivação) (QUEIROZ et.al., 1994, p.6).

Quando a corrente específica (A/m^2), aplicada nos eletrodos é muito alta, ou seja, maior que $27 A/m^2$, ocorre a formação de bolhas de hidrogênio em excesso, ocorrendo a passivação do cátodo (ALEGRE e ELGADILLO, 1993a). Isto pode ser evitado pelo controle da corrente, pela agitação da mistura a ser eletrocoagulada, ou pela inversão dos pólos dos eletrodos, limpando o cátodo (SOBRINHO e ZIMBARDI, 1987, p. 142).

As reações que explicam a eletrólise dependem do pH do meio, da condutividade e tipo de sais dissolvidos, da diferença de potencial aplicada entre os eletrodos, da corrente específica, do tempo de retenção na câmara de eletrocoagulação, da natureza da composição presente na solução ou suspensão a ser tratada, do material componente dos eletrodos (cátodo) e da forma da câmara de eletrocoagulação (GIORDANO, 1991).

PARÂMETROS DE CONTROLE DO PROCESSO

Os sistemas de tratamento são controlados objetivando a eficiência de remoção dos poluentes e os custos operacionais.

São realizados testes iniciais em escala de laboratório, nos quais o processo é testado e avaliado quanto à aplicação ao tratamento de efluentes específicos. Nestes testes são considerados parâmetros tais como: materiais dos eletrodos; distância entre os eletrodos; diferença de potencial aplicada; corrente específica; pH do meio; condutividade específica; temperatura (ALEGRE, 1993 a, b) e tempo de residência.

a) Potência elétrica

A potência elétrica está diretamente relacionada com os custos operacionais. A potência é obtida pela fórmula:

$$P = V \cdot I, \text{ onde:}$$

P = potência (W)

V = diferença de potencial (V)

I = corrente elétrica (A)

A passagem da corrente elétrica é a principal causa do processo de eletrocoagulação, sendo responsável também pelo seu custo, pois além de estar relacionada com a potência consumida está diretamente relacionada com o desgaste dos eletrodos, de acordo com a lei de Faraday.

b) Tempo de residência

O tempo de retenção da mistura a ser eletrocoagulada, entre as placas dos eletrodos, está diretamente relacionada com a eficiência do processo, considerando-se a passagem de uma mesma corrente elétrica.

c) Distância entre as placas dos eletrodos

A eficiência do processo está relacionada também com a distância entre as placas, pois a distância é proporcional à resistência elétrica da solução, oferecida à passagem da corrente.

Foi observado que as diferenças de potencial devem ser inferiores a 2V, pois acima destes valores estaria ocorrendo desperdício de potência. Diversos experimentos foram realizados para a obtenção da correlação



entre a condutividade elétrica das soluções (SAVER e DAVIS, 1994), as distâncias entre as placas de eletrodos e a diferença de potencial (PESSOA, 1996).

d) Potencial Hidrogeniônico (pH)

É recomendável que o pH esteja controlado na faixa de 6,5 a 7,0, que é a faixa onde são obtidas as maiores velocidades de reação. A velocidade de reação diminui em pH inferior (SIFUENTES, 1992), ocorrendo também um aumento da corrosão, não sendo recomendável do ponto de vista econômico (WIENDL, 1985a).

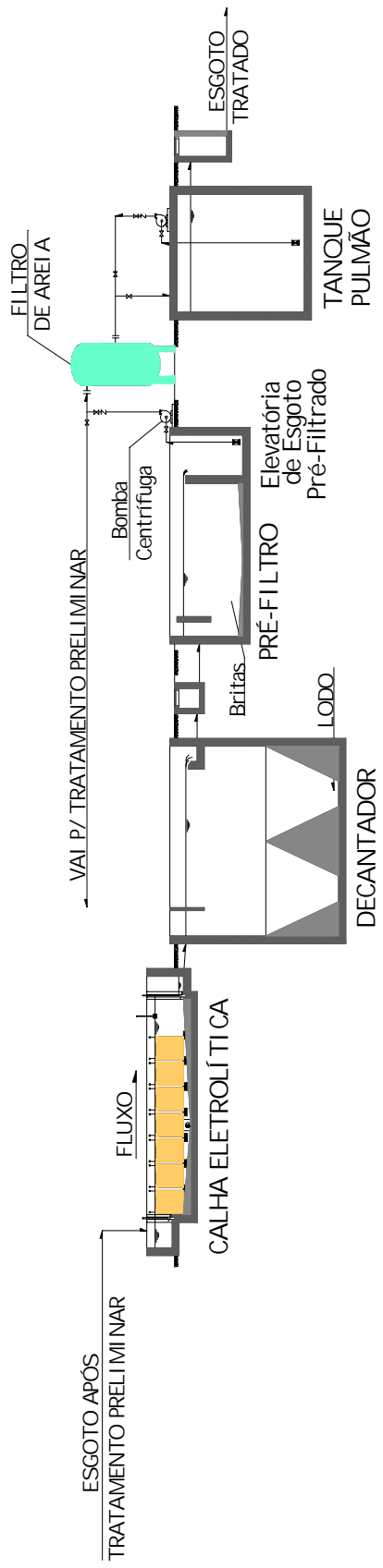
Caso o pH esteja na faixa alcalina, a velocidade da reação também irá reduzir-se. Pois a reação do cátodo forma hidroxilas, logo ocorre durante o processo eletrolítico um aumento do pH do meio. A redução de velocidade pode ser explicada pelo princípio de Le Chatelier, que estabelece que as reações em equilíbrio compensam os distúrbios causados, deslocando o equilíbrio no sentido contrário (RUSSEL, 1994, p. 689). Sempre ocorrerá um aumento do pH.

e) Temperatura

A temperatura tem influência direta na eficiência do processo eletrolítico. A eficiência do processo aumenta com o aumento da temperatura (WIENDL, 1998), principalmente porque as microbolhas do gás hidrogênio geradas ascendem mais rapidamente para a camada de espuma (flocos eletroflotados acumulados na superfície da camada eletrolítica). Este efeito reduz a passivação dos eletrodos e gera um conseqüente aumento da eficiência do processo (MANNARINO, 1997).



Figura 5 - Fluxograma do processo eletrolítico para balneários



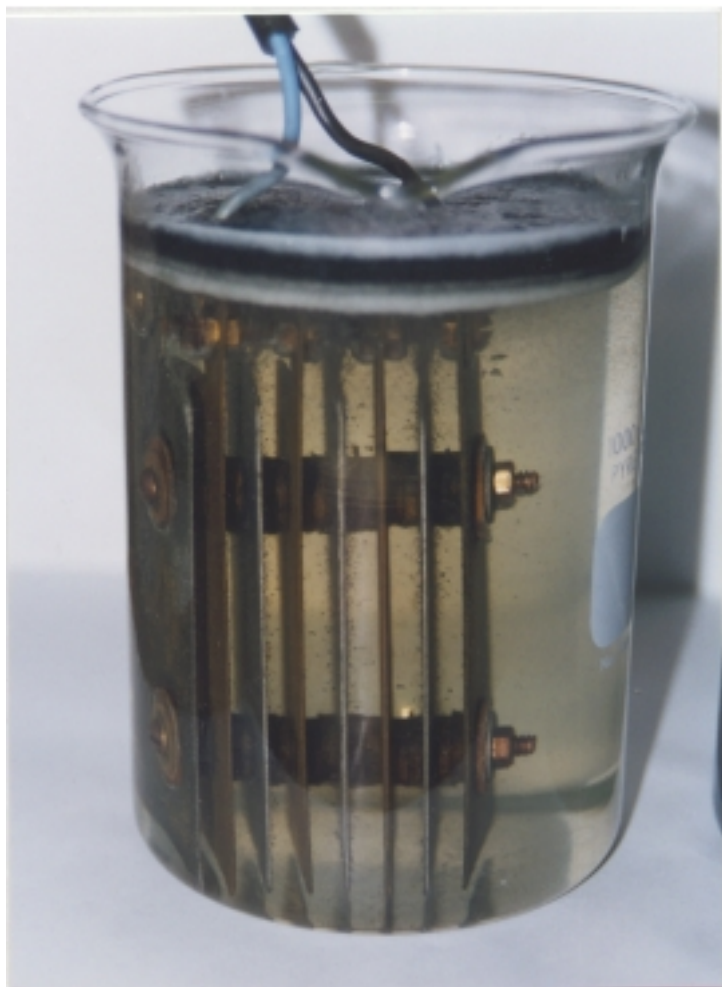


RESULTADOS / APLICAÇÕES EM BÚZIOS

REATOR ELETROLÍTICO EM ESCALA DE LABORATÓRIO

A seguir na figura 6 está representado o reator eletrolítico utilizado em escala de laboratório para confirmação dos dados utilizados para o projeto da ETE pelo processo eletrolítico implantada em Armação dos Búzios-RJ.

Figura 6 - Reator eletrolítico em escala de laboratório



A foto mostra o esgoto sendo eletrocoagulado em reator escala de laboratório.

PARÂMETROS INVESTIGADOS E FAIXAS DE VARIAÇÃO

Foram 5 os parâmetros investigados nos experimentos realizados com amostras de efluentes sanitários, conforme indicados a seguir:

- diferença de potencial (V);
- distância entre as placas;
- condutividade;
- pH;
- tempo de retenção na câmara de eletrocoagulação.

Para avaliação da eficiência do processo eletrolítico foram normalmente utilizados parâmetros para avaliação da redução da carga orgânica tais como: DQO e sólidos voláteis. Outros parâmetros tais como turbidez, cor, colimetria, fósforo e nitrogênio também foram analisados. O pH e a condutividade foram utilizados como parâmetros de controle do processo.



PROCEDIMENTOS

As amostras foram utilizadas sem a adição de nenhum produto químico, sendo processadas no mesmo dia da coleta. Foram realizados diversos ensaios em batelada objetivando escolher: as distâncias entre os eletrodos, o efeito da variação de pH, o tempo de retenção e a eficiência do processo.

CONDUTIVIDADE E DISTÂNCIA ENTRE ELETRODOS

Utilizou-se os eletrodos com a maior distância interna possível objetivando-se uma redução dos custos de instalação pela utilização do menor número de eletrodos por volume de câmara de eletrocoagulação, estabelecendo a condutividade necessária para que a diferença de potencial (ddp) não ultrapassasse 1 V. Os fenômenos associados ao processo eletrolítico ocorrem em diferença de potencial inferior a 1 V, se for empregada uma diferença de potencial maior, ocorrerá um simples desperdício de energia.

Foram utilizadas amostras de esgotos sanitários, com as condutividades originais das amostras, pela adição de água do mar, normalmente com valores superiores a 2200 $\mu\text{S} / \text{cm}$.

A cada teste o conjunto de eletrodos foi desmontado e limpo.

Foram anotadas as ddp, as condutividades e as distâncias entre os eletrodos, estando apresentados nas tabelas 2, 3 e 4.

VARIAÇÃO DO pH EM FUNÇÃO DO TEMPO DE RETENÇÃO

Foram anotados os pH da amostra sintética e esgotos sanitários, em função do tempo de retenção, estando apresentados nas tabelas 2, 3, e 4.

EFICIÊNCIA DO PROCESSO E CARACTERÍSTICAS DOS ESGOTOS SANITÁRIOS TRATADOS

Após estabelecidos os parâmetros de projeto, tais como: condutividade $>2200 \mu\text{S}/\text{cm}$; distância entre eletrodos de 1,0 cm; diferença de potencial inferior a 1 V, foram realizados ensaios nestas condições.

ENSAIOS EXPERIMENTAIS DE TRATAMENTO ELETROLÍTICO DE ESGOTOS

São apresentados resultados de ensaios de amostras de esgotos sanitários, com o objetivo de se estabelecer uma teoria para o processo eletrolítico, bem como para a elaboração de um projeto modelo de ETE eletrolítica.

Os ensaios para a obtenção dos dados foram realizados no laboratório da Tecma-Tecnologia em Meio Ambiente Ltda, nos anos de 1997, 1998 e 1999.

ENSAIOS COM ESGOTOS SANITÁRIOS

Foram coletadas amostras de esgotos sanitários na área central de Armação dos Búzios, sendo os ensaios de eletrocoagulação realizados nos laboratórios da Tecma-Tecnologia em Meio Ambiente Ltda. Os 3 primeiros testes referem-se a amostra coletada no dia 09/01/99 (tabelas 2, 3 e 4).

**Tabela 2 - Teste 1 - Esgoto sanitário da área central de Armação dos Búzios.**

PARÂMETROS	ESGOTO BRUTO	MISTURA ELETROCOAGULADA	ESGOTO TRATADO DECANTADO	ESGOTO TRATADO FILTRADO
CLORETOS, mg Cl/L	695	–	690	–
CONDUTIVIDADE, μ S/cm	3110	–	3090	–
DBO, mg O ₂ /L	340	–	73	55
DQO, mg O ₂ /L	567	–	300	71
FÓSFORO, mg P/L	6,7	–	1,0	–
NITROGÊNIO, mg N/L	58	–	40	–
pH	6,0	–	7,0	–
SS *, mg/L	250	600	66	0
SD**, mg/L	1936	–	1620	–
Sólidos sedimentáveis, ml/L	0,3	30	< 0,1	0

SS* - sólidos em suspensão e SD** - sólidos dissolvidos

Condições dos ensaios:

volume de amostra = 0,8 L
 distância entre eletrodos = 1,0 cm.
 diferença de potencial = 1,3-1,6 V
 intensidade de corrente = 1,3-1,4A
 número de pares de eletrodos = 4
 temperatura = 21° C
 tempo de eletrocoagulação = 10 min
 área molhada dos eletrodos = 0,00425 m²
 potência específica = 0,41 W / L

Tabela 3 - Teste 2 - Esgoto sanitário da área central de Armação dos Búzios.

PARÂMETROS	ESGOTO BRUTO	MISTURA ELETROCOAGULADA	ESGOTO TRATADO DECANTADO	ESGOTO TRATADO FILTRADO
CLORETOS, mg Cl/L	695	–	685	–
CONDUTIVIDADE, μ S/cm	3110	–	3060	–
DBO, mg O ₂ /L	340	–	125	40
DQO, mg O ₂ /L	567	–	220	51
FÓSFORO, mg P/L	6,7	–	0,6	–
NITROGÊNIO, mg N/L	58	–	40	–
pH	6,0	–	7,0	–
SS, mg/L	250	570	40	0
SD, mg/L	1936	–	1900	–
Sólidos Sedimentáveis, ml/L	0,3	19	<0,1	0

Condições dos ensaios:

volume de amostra = 0,8 L
 distância entre eletrodos = 1 cm
 diferença de potencial = 1,6-1,7 V
 intensidade de corrente = 1,3-1,4 A
 temperatura = 21° C
 tempo de eletrocoagulação = 10 min
 número de pares de eletrodos = 4
 intervalo de inversão de polaridade = 2 min
 área molhada dos eletrodos = 0,00425 m²
 potência específica = 0,46 W / L

**Tabela 4 - Teste 3 - Esgoto sanitário da área central de Armação dos Búzios.**

PARÂMETROS	ESGOTO BRUTO	MISTURA ELETROCO AGULADA	ESGOTO TRATADO DECANTADO	ESGOTO TRATADO FILTRADO
CLORETOS, mg Cl/L	695	–	671	–
CONDUT., $\mu\text{S/cm}$	3110	–	3040	–
DBO, mg O_2/L	340	–	104	60
DQO, mg O_2/L	567	–	280	71
FÓSFORO, mg P/L	6,7	–	0,8	–
NITROGÊNIO, mg N/L	58	–	42	–
pH	6,0	–	7,0	–
SS, mg/L	250	610	42	0
SD, mg/L	1936	–	1540	–
Sólidos Sedimentáveis, ml/L	0,3	20	<0,1	0

Condições dos ensaios:

volume de amostra = 0,8 L

distância entre eletrodos = 1 cm

diferença de potencial = 1,5-1,6 V

intensidade de corrente = 1,3-1,5 A

temperatura = 21° C

tempo de eletrocoagulação = 10 min

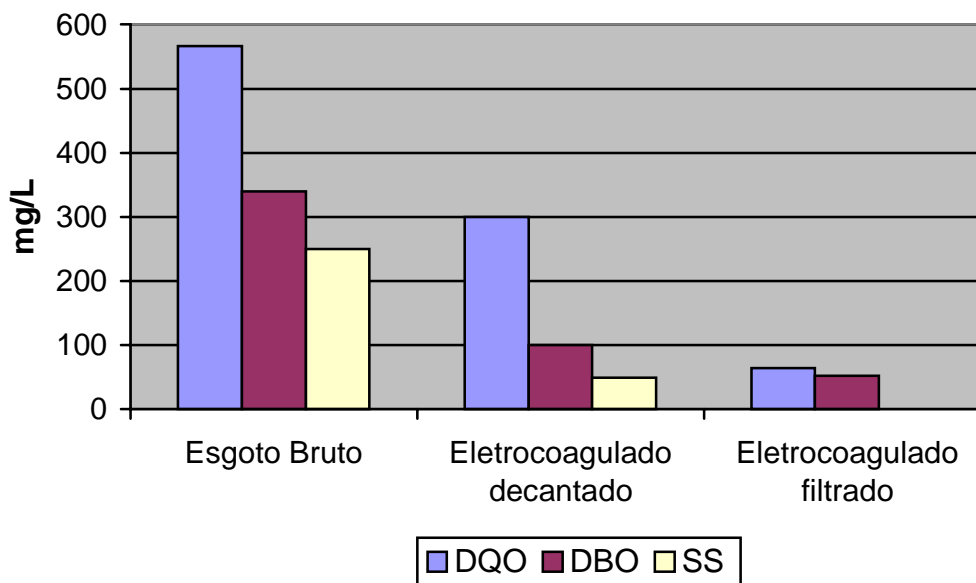
número de pares de eletrodos = 4

intervalo de inversão de polaridade = 2 min

área molhada dos eletrodos = 0,00425 m²

potência específica = 0,45 W / L

Com base nos dados experimentais obtidos com esgotos sanitários nos testes 1, 2 e 3 descritos nas tabelas 2, 3 e 4, indicando a remoção de parte da matéria orgânica e dos sólidos suspensos pelo processo eletrolítico com decantação e posterior filtração, foi obtida a figura 7 que demonstra a eficiência do processo, através dos parâmetros citados.

Figura 7- Eficiência de remoção de matéria orgânica e sólidos suspensos

O gráfico refere-se aos resultados médios obtidos.



CONCLUSÕES E SUGESTÕES

CONCLUSÕES

O perfil ambiental do município de Armação dos Búzios revelou problemas típicos dos balneários da costa brasileira que nos anos recentes passaram por uma acentuada expansão urbana e da atividade turística. Há uma grande disparidade entre a precária infra-estrutura de saneamento básico e as necessidades da população local, mesmo considerando-se apenas a população fixa. O problema torna-se mais grave quando se constata que a população total (fixa e flutuante), nas épocas de veraneio e feriados, chega a ser, no caso de Armação dos Búzios, mais de 5 (cinco) vezes maior que a população fixa. A sazonalidade da atividade turística e a conseqüente flutuação populacional são características intrínsecas aos balneários. Como conseqüência destes problemas é observada a degradação das condições de saúde pública e do meio ambiente.

O despejo de esgotos não-tratados em valas negras, por infiltração nos solos ou por lançamentos diretos nas lagoas e praias implica na contaminação generalizada do meio ambiente, incluindo as praias, as águas do subsolo e superficiais, o ar e o solo. A coleta deficiente e a disposição inadequada do lixo também resulta nas contaminações (chorume) do solo e subsolo, dos corpos hídricos e do ar. A estes problemas de poluição acrescenta-se a degradação do meio físico decorrente da ocupação desordenada do solo, a degradação da cobertura vegetal, a desestabilização de encostas, a erosão e o assoreamento dos corpos hídricos. Dentre estes impactos ambientais destaca-se a poluição hídrica causada pelo despejo de esgotos. O volume de esgotos produzido apresenta flutuações acentuadas em virtude das flutuações populacionais do balneário. Esta variabilidade do volume de esgotos gerado dificulta, ou mesmo inviabiliza, a utilização de métodos convencionais de tratamento (biológicos) que requerem uma relativa equalização das vazões afluentes às estações de tratamento. O processo eletrolítico permite uma flexibilidade operacional que vai ao encontro destas características de sazonalidade dos balneários.

O programa experimental realizado com amostras típicas dos esgotos de Armação dos Búzios tratadas em laboratório pelo processo eletrolítico produziu resultados que indicam ser este processo uma alternativa viável para o tratamento de esgotos nos balneários. Foram obtidas em laboratório eficiências de redução de DBO acima de 85% e da DQO acima de 90%.

O fósforo em todos os testes apresentou baixas concentrações finais, sempre dentro do limite de lançamento, mesmo para corpos receptores fechados (lagoas). As eficiências de remoção do fósforo sempre foram superiores a 85%. Isto pode ser explicado pela formação de FePO_4 que é pouco solúvel. A remoção do fósforo é importante para evitar a proliferação de algas e plantas aquáticas.

A alta concentração de matéria orgânica, favorece ao processo de eletrocoagulação, pois o mesmo tem seus custos ligados ao volume tratado e não à concentração da matéria orgânica. A alta concentração de cloretos, com o conseqüente aumento da condutividade, também favorece ao processo, pois permite uma maior distância entre as placas dos eletrodos, com aplicação de baixa diferença de potencial (V).

A proximidade do litoral permite também a utilização da água do mar, adicionada ao esgoto, de forma que a mistura tenha uma condutividade mínima de 3200 $\mu\text{S} / \text{cm}$.

O lodo gerado no sistema de tratamento deve ser compostado após secagem. As características importantes já conhecidas dos lodos obtidos por eletrocoagulação são: a ausência de odores e a secagem rápida. Isto pode ser explicado pela desestabilização dos colóides dos esgotos. A sua secagem é favorecida devido às condições climáticas da região.

Além dos resultados experimentais obtidos em laboratório, deve-se observar que as reduzidas áreas necessárias possibilitam as instalações das ETE's próximas à vizinhança e dos pontos geradores de esgoto, com reduzidos custos para a implantação de redes coletoras de esgotos, ou seja, reduzindo significativamente os custos de todo o sistema de esgotamento sanitário.

A modulação da instalação e a sua flexibilidade operacional permitem a implantação do processo eletrolítico no balneário de Armação dos Búzios contribuindo assim para o seu saneamento ambiental.



SUGESTÕES

O processo eletrolítico mostrou-se uma alternativa bastante promissora em termos de futuros desenvolvimentos. Pode-se incluir, a título de sugestão, a otimização do projeto dos reatores e das demais partes integrantes de uma estação de tratamento de esgotos. As condições para estas pesquisas tendem a se tornar mais favoráveis a partir do início de operação da ETE eletrolítica atualmente em fase de pré-operação no balneário de Armação dos Búzios.

Do ponto vista do saneamento ambiental a entrada em funcionamento desta estação abrirá espaços para estudos que avaliem o grau de recuperação da qualidade sanitária e ambiental nas áreas contempladas com sistema de coleta dos esgotos e tratamento pelo processo eletrolítico.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ALEGRE, R.N. e Delgadillo, S.A.M. Uso da Eletrólise na Depuração de correntes Líquidas contendo Óleos e Graxas Emulsificados (Parte II). Revista DAE, São Paulo - SP, n. 173, p.9-15, setembro-outubro-1993.b
2. CIDE - CENTRO DE INFORMAÇÕES E DADOS DO RIO DE JANEIRO. Anuário Estatístico Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 1997, CD-ROM.
3. FEEMA - FUNDAÇÃO ESTADUAL DE ENGENHARIA DE MEIO AMBIENTE. Perfil Ambiental do Município de Cabo Frio. Rio de Janeiro, 1988, 51p.
4. GENTIL, V. Corrosão, 3 ed., Livros Técnicos e Científicos S.A, 1996
5. GIORDANO, G. Projeto básico hidráulico-sanitário para o município de Angra dos Reis, ETE centro, TECMA Tecnologia em Meio Ambiente Ltda, 1991.
6. GRADY Jr, C.P.L. e Lin, H.C. Biological wastewater treatment, Pollution engineering and technology, New York: Marcel Decker, inc, 1980, 963p.
7. MANNARINO, J.C. Processo de Eletrocoagulação Aplicado a um Efluente Petroquímico. Rio de Janeiro - RJ, 1997. 30p. Projeto de Graduação IV- (Graduação em Engenharia Civil, Habilitação Sanitária) Universidade do Estado do Rio de Janeiro, 1997.
8. PESSOA, A.D. Processo de Eletrocoagulação para Tratamento de Esgotos Sanitários e Efluentes Industriais, 1996. 36p. Projeto de Graduação IV-B (Graduação em Engenharia Civil, Habilitação Sanitária) Universidade do Estado do Rio de Janeiro, 1996.
9. PULGARIN, C., Adler, N., Péringer, P. e Comminellis, C. Electrochemical Detoxification of a 1,4 - Benzoquinone Solution in Wastewater Treatment Wat. Res., Great Britain, v. 28, n.4, p. 887-893, 1994.
10. QUEIROZ, M.S, Mauro, C A, Ribeiro, C. e Abreu, E.S.V. PROCESSO ELETROLÍTICO: Uma Nova Tecnologia para Tratamento de Efluentes da Indústria do Petróleo. In: 5º CONGRESSO BRASILEIRO DE PETRÓLEO, 1994, Rio de Janeiro.
11. RAMALHO, R.S. Tratamiento de Aguas Residuales. Barcelona: Editorial Reverté S.A., 1991, 705 p.
12. ROQUE, O.C.C. Sistemas alternativos para tratamento de esgotos aplicáveis às condições brasileiras. 1997. 153p. Tese de Doutorado (Saúde Pública) ENSP-FIOCRUZ, 1997.
13. RUSSEL, J.B. Química Geral, 2ª ed., v.2, Mc Graw-Hill, Rio de Janeiro, 1994, 892p.
14. SAVER, J.E., Davis, E.J. Eletrokinetically Enhanced Sedimentation of Colloidal Contaminants. Environ Sci. Technol., v.28, n. 4, 1994, p.737- 745.
15. SIFUENTES, E.L.S.E. Estudo do Tratamento Eletrolítico das Água Residuárias de uma Indústria de Doces. 1992. 172p. Tese Doutorado (Engenharia de Alimentos): Universidade Estadual de Campinas, 1992.
16. SOBRINHO, P.A. e Zimbardi, W. Tratamento de Esgotos de áreas litorâneas por processo eletrolítico. In: 13º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 1987, São Paulo. Anais Editora ABES, Rio de Janeiro, 1987, v.2, tomo I, p.136-155.
17. WIENDL, W.G. Processo Eletrolítico no Tratamento de Esgotos Sanitários. Rio de Janeiro: ABES, 1998, 368p.
18. WIENDL, W.G. Processo Eletrolítico. Revista DAE, São Paulo, v. 45, p.142-143, Setembro de 1985, a.
19. YEH, R.S., Wang, Y.Y. e Wan, C. Removal of Cu-EDTA compounds via Electrochemical Process With Coagulation. Wat. Res., Great Britain, v. 29 n.2 p.597-599, 1995.