

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA

GUILHERME AUGUSTO ARAÚJO DUARTE

**Estudo de Caso da Aplicação de Banhado Artificial
de Fluxo Subsuperficial no Tratamento de Efluentes
Industriais**

Trabalho de Conclusão apresentado como requisito
parcial para a obtenção do grau de Engenheiro Químico

Prof. Dr. Mário Saffer
Orientador

Porto Alegre, julho de 2007.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Reitor: Prof. José Carlos Ferraz Hennemann

Vice-reitor: Prof. Pedro Cezar Dutra Fonseca

Pró-Reitor de Graduação: Prof. Carlos Alexandre Netto

Diretor do Escola de Engenharia: Prof. Alberto Tamagna

Coordenador do Curso de Engenharia Química: Prof^a Mariliz Gutterres Soares

AGRADECIMENTOS

Àqueles que de alguma forma contribuíram para realização do presente trabalho apresento meus sinceros agradecimentos. Em especial ao professor Dr. Mário Saffer, pela dedicação, atenção e orientação prestadas durante a realização do trabalho, à empresa EPCOS do Brasil Ltda., pela disponibilização dos dados e informações utilizadas e à engenheira química Milena Lorenzini, pelo apoio e esclarecimentos prestados e pela oportunidade de realização deste trabalho.

ÍNDICE

<u>AGRADECIMENTOS</u>	III
<u>LISTA DE FIGURAS</u>	VI
<u>LISTA DE TABELAS</u>	VII
<u>LISTA DE ABREVIÇÕES E SIGLAS</u>	VIII
<u>RESUMO</u>	IX
<u>1 INTRODUÇÃO</u>	1
<u>2 OBJETIVO</u>	2
<u>3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</u>	3
<u>3.1 Considerações Sobre Banhados Artificiais</u>	3
3.1.1 <u>Banhados Artificiais de Fluxo Superficial</u>	4
3.1.2 <u>Banhados Artificiais de Fluxo Subsuperficial</u>	5
<u>3.2 Mecanismos de Remoção de Poluentes</u>	7
3.2.1 <u>Introdução</u>	7
3.2.2 <u>Remoção de sólidos suspensos</u>	7
3.2.3 <u>Remoção de matéria orgânica</u>	8
3.2.4 <u>Remoção de nutrientes</u>	8
3.2.5 <u>Remoção de coliformes fecais</u>	8
3.2.6 <u>Remoção de metais</u>	9
<u>3.3 Características Construtivas</u>	9
3.3.1 <u>Diques</u>	9
3.3.2 <u>Estruturas de alimentação e descarga</u>	9
3.3.3 <u>Impermeabilizantes</u>	10
3.3.4 <u>Vegetação</u>	10
3.3.5 <u>Substratos</u>	13
<u>3.4 Operação e Manutenção</u>	16
<u>4 ESTUDO DE CASO</u>	17
<u>4.1 Processo Industrial</u>	17
4.1.1 <u>Rede Coletora</u>	18

4.1.2	<u>Características do Efluente Bruto</u>	18
4.2	<u>Descrição do Sistema de Tratamento Anteriormente Empregado</u>	19
4.3	<u>Descrição do Sistema de Tratamento Atual</u>	19
4.3.1	<u>Partida da Unidade</u>	21
4.4	<u>Modelagem Matemática</u>	22
4.4.1	<u>Balanço Hídrico</u>	22
4.4.2	<u>Aplicação do Modelo</u>	24
4.5	<u>Custos de Implantação</u>	27
5	<u>RESULTADOS E DISCUSSÕES</u>	28
6	<u>CONCLUSÕES</u>	33
7	<u>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</u>	34
8	<u>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</u>	35

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1: Elementos de um banhado artificial FSS	5
Figura 3.2: Representação dos fluxos vertical e horizontal em banhados artificiais FSS.....	6
Figura 4.1: Representação das etapas do processo de produção de capacitores eletrolíticos.....	17
Figura 4.2: Planta de instalação da estação de tratamento de efluentes.....	21
Figura 4.3: Comparação entre os dados obtidos com a aplicação do modelo e os dados reais.....	26
Figura 5.1: Eficiências de remoção de poluentes pelo banhado artificial da EPCOS.....	28
Figura 5.2: Vazão e concentrações de DBO na entrada e saída do banhado estudado.....	32

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1: Fatores a considerar na seleção das plantas.....	11
Tabela 3.2: Porosidade de leitos de banhados FSS de acordo com o material.....	14
Tabela 3.3: Valores de condutividade hidráulica reportados na literatura.....	15
Tabela 3.4: Propriedades necessárias aos solos utilizados em banhados artificiais.....	15
Tabela 3.5: Resumo das operações / manutenções necessárias.....	16
Tabela 4.1: Características do efluente bruto da EPCOS do Brasil.....	18
Tabela 4.2: Características médias do efluente após o tratamento físico-químico e eficiência.....	19
Tabela 4.3: Resumo das considerações adotadas na aplicação do modelo.....	26
Tabela 4.4: Custos de implantação do banhado artificial na EPCOS do Brasil.....	27
Tabela 5.1: Avaliação dos parâmetros adotados no projeto.....	29

LISTA DE ABREVIACÕES E SIGLAS

CE	Condutividade Elétrica
CONAMA	Conselho Nacional de Meio Ambiente
CONSEMA	Conselho Estadual de Meio Ambiente
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DQO	Demanda Química de Oxigênio
FEPAM	Fundação Estadual de Proteção Ambiental
K	Condutividade hidráulica
LO	Licença de Operação
PE	Poliestireno
PP	Polipropileno
PVC	Policloreto de vinila
SF	Sistema de Fluxo Superficial
FSS	Sistema de Fluxo Subsuperficial
SST	Sólidos Suspensos Totais
USEPA	United States Environmental Protection Agency

RESUMO

Os banhados artificiais se apresentam como sistemas ecológicos atrativos para tratamento de efluentes industriais e esgoto municipal. São energeticamente sustentáveis e possuem capacidade de remoção de contaminantes como carga orgânica, nitrogênio, fósforo, sólidos suspensos e coliformes fecais.

Uma avaliação do sistema de tratamento de efluentes aplicando banhados artificiais de fluxo subsuperficial implantado na empresa EPCOS do Brasil Ltda. – fabricante de capacitores eletrolíticos de alumínio e capacitores de filme plástico metalizado – e de seu desempenho constitui o corpo do trabalho.

O efluente na entrada do banhado apresenta concentrações médias de matéria orgânica - quantificada em termos de DBO_5 - nitrogênio, fósforo, e coliformes fecais iguais a 839,75 $mg\ O_2.L^{-1}$, 49,78 $mg.L^{-1}$, 247,41 $mg.L^{-1}$, e 2.000.000 $NMP.(100\ mL)^{-1}$, respectivamente. Os resultados de remoção média percentual desses mesmos parâmetros foram 84,21%, 81,55%, 68,77% e 98,28% respectivamente.

Palavras chave: Banhados artificiais, *Wetlands*, Tratamento de efluentes, Fluxo subsuperficial, Plantas aquáticas emergentes.

1 INTRODUÇÃO

A água é um recurso indispensável à vida e ao desenvolvimento das diversas atividades humanas. Na indústria a água pode ser empregada de diferentes formas, como por exemplo: matéria-prima, em operações de lavagem, sistemas de aquecimento e resfriamento, etc. Ao retornar aos corpos hídricos, sob a forma de efluentes, pode causar alterações significativas aos mesmos, comprometendo sua qualidade e sua disponibilidade para o uso.

A legislação brasileira, por meio da Resolução CONAMA N° 357/2005, estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes em corpos de água. No Rio Grande do Sul os padrões de liberação de efluentes em águas superficiais são estabelecidos pela Resolução CONSEMA N° 128/2006.

Nesse contexto é evidente a necessidade de desenvolvimento de ferramentas que considerem os aspectos legais, institucionais, técnicos e econômicos, relativas ao consumo da água e à geração de efluentes pela indústria. A primeira etapa nesse processo de gestão dos recursos hídricos deve ser o uso racional da água, visando reduzir o volume de captação e ainda o volume de efluentes gerados. Por fim, a possibilidade de reuso do efluente tratado deve ser considerada, empregando-se tecnologias que viabilizem essa operação.

Os banhados artificiais apresentam-se como sistemas ecológicos atrativos tanto para tratamento de efluentes industriais quanto para tratamento de esgoto municipal. São energeticamente sustentáveis uma vez que utilizam apenas processos naturais para reduzir os poluentes. Possuem a habilidade de reduzir parâmetros como DBO, DQO, sólidos suspensos, microorganismos patogênicos, nutrientes e metais (PASTOR et al., 2003), e comparados com os sistemas tradicionais, de tratamento de efluentes atualmente utilizados, requerem menores custos de construção e operação (CHEN et al., 2006). Todavia, a eficiente redução de poluentes em um banhado artificial depende de um correto dimensionamento, construção, operação e manutenção.

Procurar entender os complexos processos químicos, físicos e biológicos que ocorrem em banhados é fundamental para que sejam obtidos resultados satisfatórios tanto em relação à qualidade do efluente tratado quanto em relação ao menor custo possível, contornando ainda outras desvantagens associadas a esse tipo de tratamento. Assim, justifica-se a realização do presente trabalho, sendo realizado o estudo de caso do banhado artificial empregado no tratamento de efluentes da empresa EPCOS do Brasil Ltda., considerando os detalhes construtivos e os procedimentos aplicáveis à operação e manutenção.

2 OBJETIVO

O objetivo do presente trabalho é apresentar um estudo de caso da aplicação de banhados artificiais no tratamento de efluentes na empresa EPCOS do Brasil Ltda, fabricante de capacitores de filme plástico metalizado e capacitores eletrolíticos de alumínio.

Também será apresentada uma revisão bibliográfica sobre os mecanismos principais de remoção de poluentes em banhados artificiais, considerando os fatores construtivos e operacionais e suas conseqüências no desempenho final do tratamento.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Considerações Sobre Banhados Artificiais

Banhados, terras úmidas, ou *wetlands*, são sistemas terrestres naturais de transição entre a superfície do solo e o nível superior do lençol freático (FLECK, 2003), podendo apresentar lâminas d'água aflorantes, tipicamente inferiores à 0,6 m, que suportam o desenvolvimento de plantas aquáticas emergentes (MARQUES, 1999).

O escoamento hídrico em banhados é geralmente de fluxo lento. O fluxo lento e a pouca profundidade permitem que sólidos suspensos se sedimentem na medida em que a água escoar através do banhado. O fluxo lento também proporciona tempos de contato prolongados entre a água e as superfícies sólidas do sistema. A complexa massa de material, orgânico e inorgânico, e as diversas oportunidades de troca gás/água favorecem o desenvolvimento de comunidades de microorganismos que promovem transformações na grande variedade de substratos (USEPA, 1999).

Os banhados apresentam valores e funções. Funções são os processos inerentes que ocorrem intrinsecamente em banhados, enquanto os valores são os atributos dos banhados percebidos como benefícios para a sociedade. Em circunstâncias apropriadas os banhados podem oferecer (USEPA, 1999):

- Melhoria na qualidade da água e reservatórios para enchentes;
- Ciclagem de nutrientes e outros materiais;
- *Habitat* para peixes e animais selvagens; recreação passiva, como por exemplo a observação de pássaros e fotografia e recreação ativa, como por exemplo a caça;
- Pesquisa e educação;
- Melhoria estática da paisagem.

Reconhecidas as funções e valores dos banhados, os banhados artificiais passaram a ser uma alternativa aos sistemas convencionais de tratamento de efluentes.

Os banhados artificiais são sistemas ecológicos constituídos por canais não profundos, usualmente a profundidade é inferior a 1 m, plantados com plantas aquáticas, os quais dependem de processos físicos, químicos e biológicos para o tratamento de águas residuais. Possuem tipicamente uma camada impermeabilizante e estruturas projetadas para o controle da direção do

fluxo de líquido, tempo médio de detenção e altura do líquido. Dependendo do tipo pode ainda conter um meio poroso inerte, formado por pedregulho, brita ou areia (USEPA, 2000).

A possibilidade técnica de utilização de banhados artificiais no tratamento de efluentes e águas de escoamento superficial e o baixo custo efetivo são conseqüências de diversos fatores, a saber (USEPA, 1999):

- A construção de banhados pode ser mais barata que a de outras opções de tratamento;
- Os custos de operação e manutenção (energia e suplementos) são baixos;
- Requerem apenas manutenções e operações periódicas, não necessitando intervenções contínuas;
- Podem tolerar as oscilações na vazão;
- Facilitam o reuso e recirculação da água.

Por outro lado, podem ser citadas algumas limitações associadas ao uso de banhados artificiais no tratamento de efluentes, dentre elas (USEPA, 1999):

- Requererem normalmente maiores áreas que os tratamentos convencionais;
- Sua performance pode ser menos consistente que em tratamentos convencionais, uma vez que a eficiência do tratamento pode variar sazonalmente em resposta a alterações nas condições do ambiente, incluído precipitações e estiagem;
- Os componentes biológicos são sensíveis a produtos tóxicos como, por exemplo, amônia e pesticidas;
- Descargas bruscas de poluentes e picos de vazão podem reduzir a eficiência do tratamento;
- Requerem uma quantidade mínima de água para sobreviver. Embora possam tolerar drenagens parciais temporárias, eles não resistem à drenagem completa.

Banhados artificiais têm sido classificados pela literatura (USEPA, 2000) em dois tipos: banhados artificiais de fluxo superficial (FS) e banhados artificiais de fluxo subsuperficial (FSS). Podem ainda estes serem combinados para formar sistemas mistos.

3.1.1 Banhados Artificiais de Fluxo Superficial

Os banhados artificiais de fluxo superficial (FS) reproduzem fielmente os banhados naturais em aparência, pois contêm plantas aquáticas fixadas na camada de solo do fundo do banhado, e a água escoá sobre o terreno, entre as folhas e caule das plantas. Segundo USEPA

(1999), as vantagens de utilização dos banhados artificiais FS são o baixo custo inicial e de operação e sua construção, operação e manutenção, que são de fácil entendimento, e execução. A principal desvantagem é que geralmente eles requerem área muito maior que os outros sistemas.

3.1.2 Banhados Artificiais de Fluxo Subsuperficial

Banhados artificiais de fluxo subsuperficial (FSS) são compostos por um ou mais leitos, preenchidos com substrato poroso, permitindo o desenvolvimento de espécies de plantas selecionadas e microorganismos. O fundo do leito é reforçado com uma camada impermeabilizante. A figura 3.1 ilustra os principais componentes de um banhado artificial FSS.

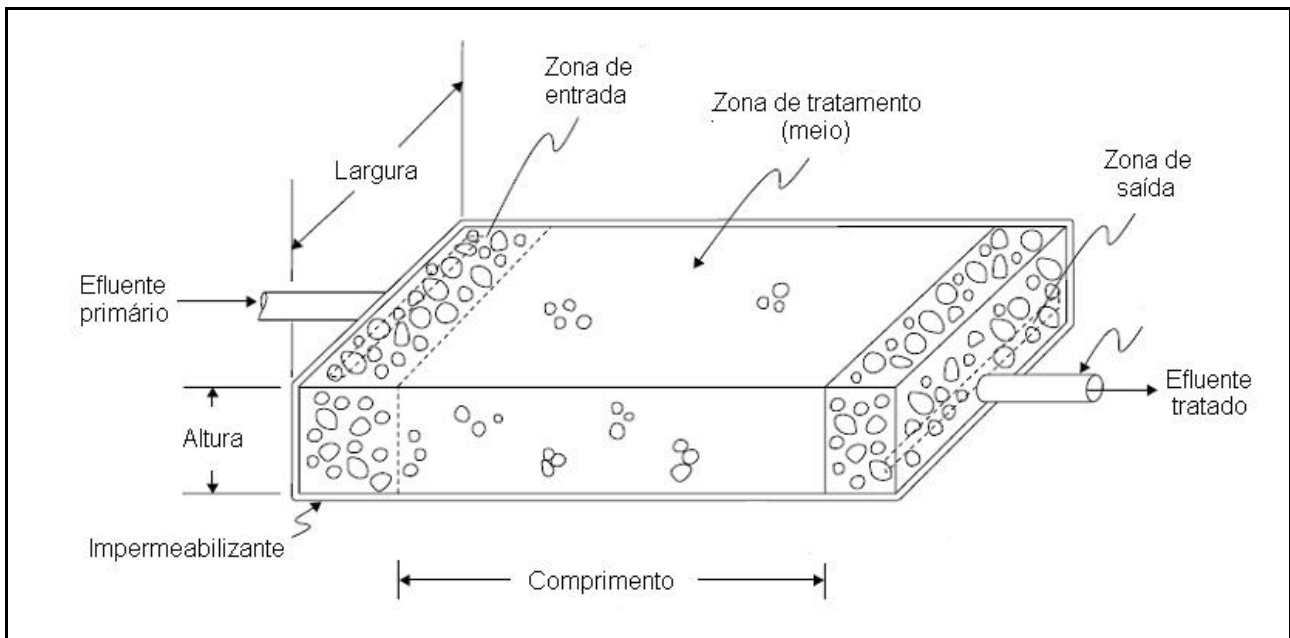


Figura 3.1: Elementos de um banhado artificial FSS (Adaptado de USEPA, 2000).

O nível do líquido é projetado para permanecer abaixo do nível do leito (USEPA, 1999), sendo o fluxo do líquido horizontal, ou, alternativamente, vertical, conforme se vê na figura 3.2.



Figura 3.2: Representação dos fluxos vertical e horizontal em banhados artificiais FSS.

As vantagens citadas por USEPA (1999) para os FSS são: a maior tolerância às baixas temperaturas, minimização de pestes e problemas com odores, maior potencial de assimilação por unidade de área que em sistemas SF. Já USEPA (2000) apresenta como principal vantagem dos sistemas FSS sobre os sistemas SF a isolação do efluente de vetores, animais e humanos. Preocupações com mosquitos e transmissões patogênicas são severamente reduzidas com os sistemas FSS. Sistemas adequadamente projetados e operados podem ainda não necessitar cercas ou outro elemento de isolação.

Comparando os sistemas FSS convencionais com sistemas SF de mesmo tamanho, os primeiros apresentam tipicamente maior custo de construção, principalmente por causa do custo do meio granular (USEPA, 2000).

Devido às restrições impostas pelo substrato, banhados artificiais FSS adaptam-se melhor ao tratamento de efluentes com baixas concentrações de sólidos e sob condições de fluxo hídrico relativamente uniformes (USEPA, 1999).

Segundo Caselles-Osorio e Garcia (2006) o pior problema reportado sobre a performance de sistemas de larga escala em diferentes regiões e países é o progressivo bloqueio que ocorre próximo à região de entrada, o qual é resultante do aprisionamento de sólidos e sedimentação, desenvolvimento de biofilme, e precipitação química (BLAZEJEWSKI e MURAT-BLAZEJEWSKA, 1997, apud CASELLES-OSORIO e GARCIA, 2006). Todos esses processos promovem a oclusão dos espaços intersticiais, o que leva a uma redução da condutividade

hidráulica e volume efetivo, e a um aumento da velocidade do líquido (TANNER e SUKIAS, 1995 apud CASELLES-OSORIO e GARCIA, 2006). Para prevenir que o meio granular seja bloqueado muito rapidamente, USEPA (2000) recomenda não exceder uma carga orgânica de 25 g de DBO.m².dia⁻¹ no caso de banhados artificiais FSS de fluxo vertical. Em comparação, para sistemas de fluxo horizontal, uma carga orgânica inferior a 6 g de DBO.m².dia⁻¹ é recomendada (USEPA, 2000).

Em efluentes com alto teor de sólidos e carga orgânica é necessária uma etapa prévia para evitar a obstrução do meio. Caselles-Osorio e Garcia (2006) conduziram experimentos e concluíram que o pré-tratamento físico-químico estende significativamente o tempo de operação de um banhado FSS.

3.2 Mecanismos de Remoção de Poluentes

3.2.1 Introdução

A remoção dos poluentes dá-se através da complexa interação entre os elementos presentes no meio. Os principais mecanismos que ocorrem em sistemas de tratamento de efluentes são as separações sólido-líquido e as transformações dos constituintes. Separações tipicamente incluem a separação por gravidade, filtração, absorção, adsorção, trocas de íons e lixiviação. As reações podem ser químicas ou bioquímicas.

A característica fundamental dos banhados é que suas funções são amplamente reguladas pelos microorganismos – bactérias, fungos, protozoários, algas – e seus metabolismos. A atividade microbiana é a maior consumidora de carbono e demais nutrientes. Ela transforma um grande número de compostos orgânicos e inorgânicos em substâncias inóculas ou insolúveis, altera as condições de oxidação e redução do substrato e, conseqüentemente, altera a capacidade de processamento do banhado (USEPA, 1999).

As transformações bacterianas podem ocorrer tanto em ambientes aeróbios quanto em ambientes anaeróbios e facultativos. O que ocorre é um ajuste da população em resposta a alterações nas condições ambientais.

3.2.2 Remoção de sólidos suspensos

Sólidos suspensos totais são tanto removidos quanto produzidos pelos processos naturais dos banhados. Os mecanismos físicos predominantes na remoção são a floculação/sedimentação

e filtração/interceptação, enquanto a produção pode ocorrer pela morte de invertebrados, fragmentação dos detritos das plantas, produção de plâncton e microorganismos no seio da coluna de líquido ou aderidos às superfícies das plantas, e pela formação de precipitados como por exemplo o sulfeto férrico. Em sistemas FSS, o principal mecanismo de remoção é a floculação e sedimentação de sólidos coloidais e supracoloidais. O leito atua como um filtro, promovendo oportunidades de separação dos SS por sedimentação gravitacional, filtração e captura física, e adsorção no biofilme aderido ao meio e às raízes das plantas (USEPA, 2000).

3.2.3 Remoção de matéria orgânica

O material orgânico pode ser removido em banhados por processos físicos de separação e conversões bioquímicas.

A separação física de material orgânico particulado em sistemas SF pode ocorrer pelos mesmos mecanismos descritos para os SS. Já o material orgânico solúvel pode ser removido por adsorção/absorção ao biofilme e na presença de oxigênio ser convertido pelos microorganismos em CO₂, formas oxidadas de nitrogênio e enxofre e água. Sob condições anaeróbicas pode ser convertido em ácidos orgânicos e álcoois. Sob condições anaeróbicas muito específicas, pode ocorrer metanogênese, convertendo o material orgânico em produtos gasosos de CH₄, CO₂ e H₂ (USEPA, 2000).

3.2.4 Remoção de nutrientes

Nitrogênio (N) e fósforo (P) são os nutrientes considerados para remoção em sistemas de banhados. Os mecanismos de remoção de N incluem a absorção pelas plantas e outros organismos vivos, mineralização, nitrificação, desnitrificação, volatilização da amônia, e a troca catiônica para amônio (YANG et al., 2001). Como mecanismos de remoção de P são incluídos a adsorção química e precipitação e as transformações biológicas. Entretanto, Adler et al. (1996) consideram que os mecanismos para remoção de nitrogênio e fósforo em banhados são, respectivamente, a desnitrificação biológica por microorganismos e a adsorção química de P em hidróxidos minerais de Fe, Al e Ca presentes no solo.

3.2.5 Remoção de coliformes fecais

O processo de remoção de bactérias envolve mecanismos físicos, químicos e biológicos. Substâncias bacteriais podem ser excretadas pelas raízes de *helophytes*, porém se essas substâncias existem em concentração suficiente ou são capazes de fornecer uma contribuição real

na eliminação de bactérias em banhados artificiais, no entanto, permanecem questões em aberto (WAND et AL., 2007). Outros supostos processos envolvem a filtração pelo leito, a ação UV solar e a morte natural. Wand et al. (2007) apontam como principal fator na remoção de bactérias em banhados artificiais a predação por protozoários.

3.2.6 Remoção de metais

Em banhados artificiais as interações com o substrato removem a maioria dos metais contaminantes. A permanente ou temporária condição anóxica no solo ajuda a criar um ambiente de imobilização de metais pesados em sulfetos reduzidos ou na forma metálica. As plantas também podem exercer uma importante função, por meio da filtração, adsorção, troca de cátions, e alterações químicas induzidas pelas raízes na rizosfera (LIU et al., 2007).

Liu et al. (2007) conduziram experimentos com 19 tipos de plantas e concluíram que o principal processo de remoção de metais pesados em banhados artificiais é a sedimentação, e que as plantas foram importantes tanto na fitoextração quanto em promovendo sítios para a precipitação dos metais.

3.3 Características Construtivas

3.3.1 Diques

Os diques devem ser profundos o suficiente para conter o volume de líquido esperado e ainda prover uma borda livre para conter ocasionais elevações na vazão de alimentação e volume de chuvas (USEPA, 1999), tipicamente a profundidade da borda livre é de 0,6 a 1 m (USEPA, 2000).

3.3.2 Estruturas de alimentação e descarga

As estruturas de entrada e saída distribuem o fluxo hídrico uniformemente, e controlam os caminhos do escoamento através do banhado e a profundidade do líquido. Múltiplas entradas e saídas, regularmente espaçadas, são essenciais para garantir a distribuição uniforme do fluxo hídrico através do banhado e prevenir a formação de zonas mortas, que podem reduzir significativamente o tempo de retenção hidráulico.

Na saída, caixas de concreto, construídas no local ou pré-fabricadas, dispostas regularmente e espaçadas ao longo da largura do banhado são instaladas para garantir a

distribuição uniforme da vazão. A distância preferencial entre cada uma das caixas varia entre 5 e 10 m, mas pode ser maior, dependendo da largura da célula (USEPA, 2000).

3.3.3 Impermeabilizantes

Os banhados artificiais devem ser isolados para evitar a contaminação das águas subterrâneas e também para prevenir que estas se infiltrem no banhado (USEPA,1999).

A cobertura deve ser forte, grossa e completamente plana para prevenir a aderência e penetração das raízes. Caso o solo contenha rochas angulares, um leito de areia ou uma camada de tecido geossintético (aproximadamente 5 cm) deve ser colocada para prevenir a ruptura da camada impermeabilizante (USEPA, 1999).

Os materiais sintéticos impermeabilizantes utilizados são aqueles tipicamente empregados em lagoas e açudes. Esses materiais incluem policloreto de vinila (PVC), polietileno (PE) e polipropileno (PP). Argila compactada também pode ser usada para impermeabilização do terreno. Segundo USEPA (2000), tipicamente a espessura da camada de argila deve ser de 0,3 m ou mais para assegurar a barreira hidráulica necessária.

3.3.4 Vegetação

Na remoção de poluentes, a vegetação exerce influência significativa. Tanto as plantas vasculares (plantas superiores) como as não vasculares (algas) são importantes. A fotossíntese realizada por algas aumenta o oxigênio dissolvido na água que, conseqüentemente, afeta as reações de nutrientes e metais. As plantas vasculares contribuem com o tratamento de diversas maneiras (USEPA, 1999):

- Estabilizando o substrato e limitando a formação de caminhos preferenciais;
- Reduzindo a velocidade do escoamento, permitindo que materiais suspensos sedimentem;
- Absorvendo carbono, nutrientes, elementos traço, incorporando-os aos seus tecidos;
- Atuando na transferência de gases entre a atmosfera e o sedimento;
- A transferência de oxigênio a partir das estruturas subsuperficiais da planta forma microsítios oxigenados com os sedimentos;
- Seus sistemas de raízes e caules servem de superfície para fixação dos microorganismos;

- Através da queda de suas partes mortas, fornecem carbono, nitrogênio e fósforo para alimentar os processos microbianos.

Macrófitas emergentes são componentes estruturais muito importantes nos banhados. Suas diversas adaptações permitem o crescimento competitivo em solos saturados ou alagados. Essas adaptações incluem uma ou mais das seguintes qualidades: lenticelas (pequenas aberturas através das folhas e caules), que permitem o fluxo de ar no interior da planta; aerênquimas, que permitem a convecção gasosa em toda extensão do comprimento da planta, a qual fornece ar para as raízes; estruturas de crescimento morfológico especiais [...], que promovem aeração adicional às raízes; raízes, que espontaneamente absorvem os gases e nutrientes presentes no efluente; e tolerância fisiológica às substâncias produzidas como resultado do crescimento em solos em condições anaeróbias (USEPA,2000).

Segundo Yang et al (2001) a vegetação aquática é responsável por 90% do oxigênio disponível na rizosfera. Com isso são criadas as condições aeróbias que auxiliam o desenvolvimento dos microorganismos heterótrofos e autotróficos, que participam da decomposição do material orgânico e nitrificação.

SELEÇÃO DE ESPÉCIES

Segundo Tanner et al. (2006). as espécies de plantas selecionadas devem ser capazes de: tolerar as condições ambientais presentes no banhado, incluindo clima, profundidade da água e qualidade do efluente; estabelecerem-se rapidamente, para formar uma cobertura vegetal densa, com alta capacidade de remoção de poluentes, resistência à plantas daninhas e de servirem como pastagem para aves aquáticas. Outros fatores citados por USEPA (2000) a serem considerados na seleção das plantas são apresentados na tabela 3.1.

Tabela 3.1: Fatores a considerar na seleção das plantas.

Fatores	Comentários
Espécies nativas	A utilização de plantas que crescem localmente aumenta a possibilidade de sobrevivência das mesmas e aceitação por autoridades locais.
Espécies invasivas ou agressivas	Plantas que possuem crescimento muito acelerado, que não possuem competidores naturais e plantas que prejudicam outras espécies de plantas pela secreção de substâncias tóxicas podem expulsar outras espécies e acabar com a diversidade.

Tolerância à elevada carga de nutrientes	Os banhados artificiais estarão sujeitos à alimentação contínua de efluente, com elevada concentração de nutrientes. Plantas que não tolerem essa condição não sobreviverão.
Tolerância à inundação contínua	Os banhados artificiais receberão uma vazão contínua de efluentes. Plantas que necessitam periódicas ou ocasionais situações de seca como parte de seus ciclos reprodutivos não sobreviverão.
Características de crescimento	Plantas pereniais são geralmente preferidas sobre as plantas anuais, uma vez que as plantas crescerão continuamente na mesma área e não haverá preocupação em as sementes serem arrastadas. Para espécies emergentes, plantas persistente são preferidas sobre as semi- ou não-persistentes, pois o arranjo permanente proporciona proteção adicional e isolamento durante a estação de inverno. ¹
Forma disponível para o plantio	Os custos de obtenção e plantio irão variar dependendo da forma de plantio do material. As formas inteiras (por exemplo, mudas de raiz nua e plugs) serão usualmente mais caras que as parciais (por exemplo, sementes e porta-enxerto). Porém, o fornecedor poderá garantir uma maior taxa de sobrevivência. ²
Taxa de crescimento	Crescimentos mais lentos irão requerer um maior número de plantas, plantadas mais próximas (densidade) na partida para obter-se a mesma cobertura vegetal na estação inicial de crescimento.
Benefícios à vida selvagem	Caso o banhado seja utilizado como <i>habitat</i> , plantas que fornecem alimento, proteção, abrigo e ninho para os animais desejados devem ser selecionadas.
Diversidade de plantas	Monoculturas de plantas são mais suscetíveis à dizimação por insetos ou doenças. Infestações catastróficas irão afetar negativamente temporariamente a performance do tratamento. A maior diversidade tende também a aumentar a diversidade de animais.

¹ Perenial – As porções acima do solo morrem, porém as porções da planta abaixo do solo permanecem vivas e inativas, brotando na próxima estação de crescimento.

Anual – A planta morre completamente e a reprodução acontece apenas através das sementes produzidas antes da morte da planta.

Persistente – As porções mortas, situadas acima do solo, permanecem em pé durante a estação de dormência.

Semi-persistente - As porções mortas, situadas acima do solo, permanecem em pé durante algum tempo, durante a estação de dormência, antes de decaírem.

Não-persistente - As porções mortas, situadas acima do solo, decaem e são arrastadas ao final da estação de crescimento.

² Planta de raiz nua – Mudas que tiveram as raízes lavadas para remoção do solo.

Plug – Mudas cujo solo permanece aderido às raízes (torrão).

Porta-enxerto – Peçaço do caule subterrâneo (rimazona).

Espécies nativas não devem ser removidas do ambiente natural. Geralmente, plantas para construção e restauração de banhados artificiais são melhor obtidas quando adquiridas de fornecedores estabelecidos e confiáveis (TANNER et al., 2006).

ESTABELECIMENTO DAS PLANTAS

O estabelecimento das plantas pode ser relativamente rápido e simples se for conduzido corretamente desde o princípio. Contudo, os problemas podem multiplicar-se, tornando-se de difícil resolução quando conduzidos em concordância com fatores como (TANNER et al., 2006):

- Plantio no período errado do ano ou muito tarde dentro de uma estação;
- Provisão insuficiente ou excessiva de água;
- Uso de solo ou leito inapropriado;
- Danos às plantas causados por animais selvagens;
- Competição e supressão por espécies selvagens;
- Sufocamento causado por lodo carregado a partir de etapas anteriores do tratamento;

Segundo Tanner et al. (2006), o plantio é melhor conduzido [...] durante a primavera ou próximo ao início do verão, geralmente entre setembro e dezembro, sendo que quanto antes melhor.

Durante o plantio, o nível de água deve ser mantido próximo ao nível superior do solo ou da brita. O plantio geralmente deve ser conduzido a uma densidade de 4 plantas por metro quadrado, devendo uma pequena área (5 x 5 m) ser inicialmente demarcada e plantada para servir de guia visual para o plantio do restante do banhado. As plantas devem ser plantadas a uma profundidade de 40-60 mm, e necessitam ser bem fixadas para evitar que sejam arrancadas quando o nível de água for elevado (TANNER et al., 2006).

Na fase de estabelecimento, o banhado deve ser inspecionado freqüentemente para identificar danos provocados por animais. Cercas elétricas podem ser necessárias para impedir o acesso desses animais.

Em sistemas FSS, o nível de líquido pode ser mantido a aproximadamente 20 cm da superfície do leito durante o plantio. Uma vez estabelecidas as plantas, o nível operacional deve permanecer 10-30 cm abaixo do nível superior do leito, podendo ser elevado até 300 mm acima do nível superior do leito por curtos períodos (entre uma e duas semanas), para facilitar o controle de espécies selvagens suscetíveis (TANNER et al., 2006).

3.3.5 Substratos

O substrato está diretamente envolvido na eliminação de poluentes através de interações físico-químicas como filtração e sedimentação de sólidos suspensos, filtração de organismos

patogênicos, adsorção de matéria orgânica, nitrogênio, fósforo e metais pesados (VRHOVSEK et al., 1996). Indiretamente o substrato atua como suporte para o sistema de raízes e como área superficial de adesão de microorganismos.

MEIO POROSO

Banhados artificiais que recebem efluentes com alta carga de nutrientes podem ser construídos com areia ou brita (USEPA, 1999).

Em sistemas FSS, a brita é o meio mais comumente empregado, porém, areia, pedregulho e material plástico também podem ser usados. Leitos de brita de maior diâmetro são recomendados para prevenir a obstrução do meio, enquanto leitos de britas menores podem ser usados para garantir um melhor suporte para o enraizamento. Segundo Tanner et al. (2006), tamanhos de partícula entre 20 e 30 mm asseguram bom desenvolvimento e espalhamento das raízes.

Dependendo do tipo e dimensões do material empregado, o leito pode ter diferente porosidade e conferir diferente perda de carga ao escoamento. A tabela 3.2 apresenta valores apresentados por Pastor et al. (2003) típicos de porosidade para materiais comumente empregados.

Tabela 3.2: Porosidade de leitos de banhados FSS de acordo com o material.

Material	Diâmetro efetivo (mm)	Porosidade (%)
Areia	2	28-32
Areia	8	30-35
Brita fina	16	35-38
Brita média	32	36-40
Pedregulho pequeno	128	38-45

A condutividade hidráulica K em um banhado FSS é responsável pelo maior impacto na perda de carga. Ela varia com o tempo e com o meio e é de difícil determinação, uma vez que depende de fatores não quantificáveis, como o bloqueio do meio causado pelo crescimento das raízes e acúmulo de sólidos. Contudo um valor deve ser assumido para fins de projeto. Típicos valores de K e a variação em função do tempo de operação do banhado para diferentes meios, conforme USEPA (2000), são apresentados na tabela 3.3.

Ainda, os valores conservativos de K=1% do valor de K limpo – 30% iniciais do leito – e K=10% do valor de K limpo – 70% finais do leito - são recomendados para longos períodos de operação.

Tabela 3.3: Valores de condutividade hidráulica reportados na literatura.

Tamanho e tipo e meio	K (m.dia ⁻¹) Limpo/Sujo	Tipo de efluente (SS típico, Kg.m ⁻³)	Tempo de operação	Notas
Brita 5-10 mm Brita 5-10 mm	34.000/12.000 34.000/900	Secundário (100)	2 anos	K=12.000 usado para os últimos 80 m do leito. K=900 para os primeiros 20 m.
Pedregulho 17 mm Brita fina 6 mm	100.000/44.000 21.000/9.000	Solução nutriente (neg)	4 meses	neg = negligenciável
Brita grossa 30-40 mm	NR/1000	Secundário (30)	2 anos	Efluente de lagoa contendo algas; apenas o leito de britas sem as plantas
Brita fina 5 mm	6.200/600	Lixiviado de aterro (neg)	26 meses	
Pedregulho 19 mm	120.000/3.000	Efluente de tanque séptico (50)	7 meses	

SOLO

Qualquer solo com propriedades agronômicas satisfatórias pode ser usado (USEPA, 2000). Quando utilizado devem ser observadas as suas características que incluem: a capacidade de troca de cátions, pH, condutividade elétrica (CE), textura e material orgânico. Os solos devem ser analisados antes de serem empregados em banhados artificiais. A tabela 3.4 apresenta um resumo das características que segundo USEPA (1999), deve possuir o solo empregado.

Tabela 3.4: Propriedades necessárias aos solos utilizados em banhados artificiais.

Propriedade	Comentários	Limites
Condutividade elétrica (CE)	Afeta a capacidade do banhado processar o efluente que escoar.	em CE < 4 mmho.cm ⁻¹
pH	O pH afeta a disponibilidade e retenção de metais pesados e nutrientes	6,5 < pH < 8,5
Área superficial da partícula e carga elétrica	Solos com carga global negativa, propiciam sítios de ligações eletrostáticas e para íons de cargas positivas (cátions), como Ca ²⁺ , Mg ²⁺ , Fe ²⁺ , Al ³⁺ e Mn ²⁺ .	> meq. (100g solo) ⁻¹
Textura	A textura do solo afeta o desenvolvimento das raízes e atividade microbiana, de modo especial durante a partida. Solos arenosos ou aqueles que consistem de	<i>Loamy soils</i> são especialmente apropriados pois são leves e facilmente se quebram em pequenas partículas, facilitando a penetração

Propriedade	Comentários	Limites
	partículas relativamente grandes possuem baixo potencial de retenção de poluentes, porém impõem pouca ou nenhuma restrição ao crescimento das raízes.	das raízes. Solos muito densos devem ser evitados pois impedem a penetração das raízes, possuem insuficiência de nutrientes e baixa condutividade hidráulica.

3.4 Operação e Manutenção

A manutenção regular ajuda a garantir que o banhado opere corretamente e que problemas em potencial sejam identificados em estágio inicial. As principais áreas que precisam ser observadas são o sistema de pré-tratamento, as plantas, estruturas de entrada e saída, diques e cercas. Um resumo das operações de manutenção necessárias, conforme Tanner et al. (2006) é apresentado na tabela 3.5.

Tabela 3.5: Resumo das operações / manutenções necessárias.

Estrutura	Operação	Frequência
Plantas	<ul style="list-style-type: none"> Inspeção visual da saúde das plantas e danos causados por animais. 	Semanal
	<ul style="list-style-type: none"> Verificação do nível da água e ajuste apropriado (especialmente durante períodos de seca e quando a vazão de alimentação de efluente for baixa). 	
	<ul style="list-style-type: none"> Controle de espécies selvagens por meio de coleta manual, aplicação de herbicidas ou aumento do nível de líquido. 	Mensal
Sistema de entrada	<ul style="list-style-type: none"> Inspeção visual para verificação da vazão de entrada e identificação de bloqueios e avarias. 	Semanal
	<ul style="list-style-type: none"> Verificação do sistema de distribuição uniforme da vazão e ajuste. 	
Sistema de saída	<ul style="list-style-type: none"> Inspeção visual para identificação de bloqueios e avarias. 	Semanal
	<ul style="list-style-type: none"> Limpeza de quaisquer plantas ou bloqueios ao redor das estruturas. 	
	<ul style="list-style-type: none"> Ajuste do nível conforme necessário 	
Diques	<ul style="list-style-type: none"> Inspeção visual para identificação de espécies selvagens, erosão, e danos causados por animais. 	Semanal
	<ul style="list-style-type: none"> Corte de grama nos diques externos e arredores do banhado. 	Mensal
Pré-tratamento	<ul style="list-style-type: none"> Inspeção visual da integridade das instalações. 	Mensal

4 ESTUDO DE CASO

A partir do desenvolvimento teórico apresentado será feito o estudo do sistema de banhados artificiais implantado para o tratamento dos efluentes líquidos da empresa EPCOS do Brasil Ltda. - fabricante de capacitores eletrolíticos de alumínio e de capacitores eletrostáticos de filme plástico - localizada na cidade de Gravataí/RS, abordando os parâmetros adotados no projeto, o desempenho apresentado e as conseqüências das características de projeto e operação na qualidade final do efluente tratado.

4.1 Processo Industrial

As etapas do processo de fabricação dos capacitores eletrolíticos de alumínio na EPCOS do Brasil bem como os pontos de geração de efluentes líquidos estão representados na figura 4.1.

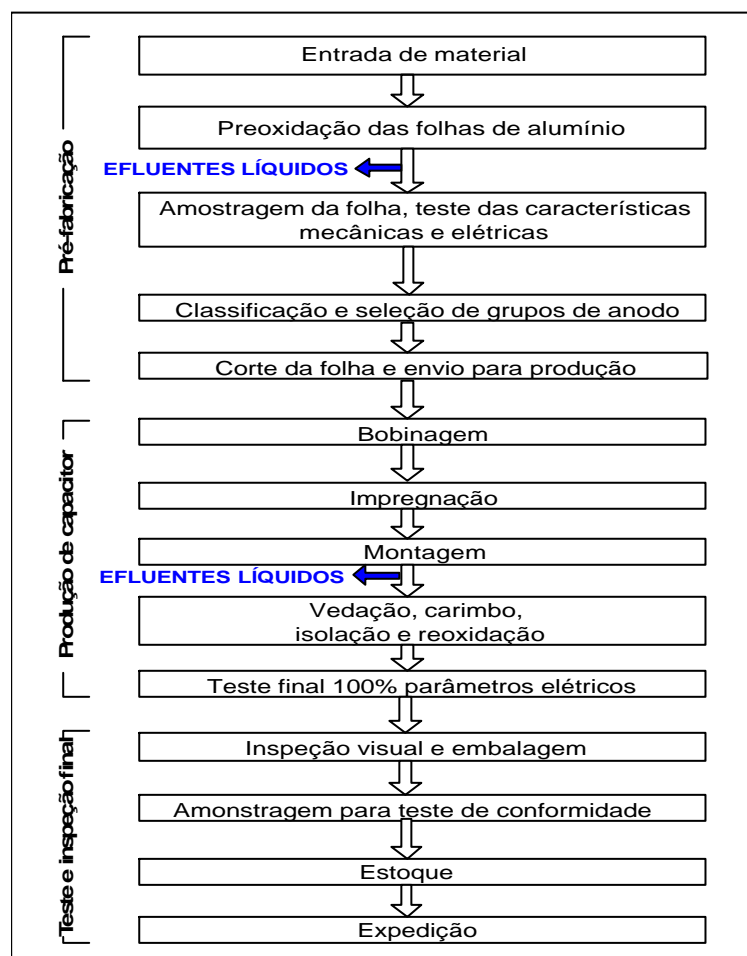


Figura 4.1: Representação das etapas do processo de produção de capacitores eletrolíticos.

O efluente na pré-oxidação das folhas de alumínio corresponde ao descarte das soluções empregadas nos banhos de pré-oxidação e também às soluções de ácido clorídrico e hidróxido de sódio usadas para regeneração das resinas da coluna de troca iônica. Na etapa de montagem, o efluente corresponde à água de lavagem das peças.

O processo de produção de capacitores eletrostáticos de filme metalizado não utiliza água, e não gera efluentes. Outras fontes de geração de efluentes na empresa são os sanitários e o refeitório.

4.1.1 Rede Coletora

Os efluentes industriais e sanitários são coletados por meio de uma rede subterrânea em PVC ou concreto e conduzidos, segregadamente por ação da gravidade, para 2 tanques de recepção com volume de 5 m³ cada. Os tanques estão interligados de forma que o líquido transbordante de um deles é recebido no segundo, ocasionando a mistura das correntes (chamada de efluente bruto).

4.1.2 Características do Efluente Bruto

As características relevantes médias do efluente bruto na saída dos tanques de recepção são apresentadas na tabela 4.1, onde os valores correspondem aos resultados de análises realizadas por laboratório credenciado pela FEPAM, em vinte amostras do efluente bruto coletadas uma a cada semana, no período de 23/01/2007 até 19/06/2007.

Tabela 4.1: Características do efluente bruto da EPCOS do Brasil.

Parâmetro	Unidade	Concentração		
		Mínima	Máxima	Média
DBO ₅	g O ₂ .m ⁻³	315	1600	1059
DQO	g O ₂ .m ⁻³	938	4620	2729
Nitrogênio	g N.m ⁻³	37,41	109,65	63,58
Fósforo	g P.m ⁻³	8,31	71,01	40,98
Sólidos suspensos totais	g .m ⁻³	87	500	226,47
pH	-	4,73	6,79	5,54
Vazão	m ³ .dia ⁻¹	80,85	358,75	175,0

4.2 Descrição do Sistema de Tratamento Anteriormente Empregado

O tratamento de efluentes por banhados foi implementado em substituição ao antigo tratamento biológico, composto por duas lagoas de estabilização dispostas em série, que se mostrava ineficiente e não vinha atendendo aos padrões estabelecidos pelo órgão ambiental para os parâmetros nitrogênio, fósforo, DQO e coliformes fecais.

4.3 Descrição do Sistema de Tratamento Atual

TRATAMENTO FÍSICO-QUÍMICO

O efluente bruto é bombeado dos tanques de recepção, através de uma tubulação em PVC com diâmetro de 150mm, onde é feito o monitoramento do pH do efluente e dosado o floculante orgânico a base de tanino vegetal ACQUAPOL[®], até o acondicionador/decantador. A bomba empregada possui vazão máxima de 35 m³.h⁻¹, operando em regime intermitente, sendo acionada por uma bóia.

O decantador é construído em concreto e possui um volume de 84 m³, onde ocorre a sedimentação dos coágulos formados no acondicionador. A corrente clarificada do decantador é encaminhada por gravidade para o banhado artificial, e o lodo é retirado pelo fundo por bombeamento para o adensador de lodo.

O adensador é feito em fibra com volume de 7 m³. A corrente clarificada do adensador é também conduzida ao banhado artificial, enquanto o lodo adensado é bombeado para o filtro prensa.

A torta formada no filtro é recolhida manualmente e colocada em uma caçamba coberta, para posterior destinação final. O filtrado é encaminhado ao banhado artificial.

As características do efluente na saída do tratamento físico-químico são apresentadas na tabela 4.2. Os valores da tabela correspondem aos resultados de análises realizadas por laboratório credenciado pela FEPAM, em vinte amostras do efluente bruto coletadas uma a cada semana, no período de 23/01/2007 até 19/06/2007.

Tabela 4.2: Características médias do efluente após o tratamento físico-químico e eficiência.

Parâmetro	Unidade	Concentração na alimentação			Eficiência média da remoção(%)
		Mínima	Máxima	Média	
DBO ₅	g O ₂ .m ⁻³	240	1160	839,75	22,05
DQO	g O ₂ .m ⁻³	4000	708	2138	15,07
Nitrogênio	g N.m ⁻³	5,71	91,16	49,78	24,28
Fósforo	g P.m ⁻³	4,80	66,41	27,41	16,69
Sólidos suspensos totais	g .m ⁻³	20	140	48,09	74,59

BANHADO ARTIFICIAL DE FLUXO SUBSUPERFICIAL

O banhado artificial possui uma área total de 5.287 m² e um volume total de 4.230 m³ e foi construído aproveitando-se a estrutura da primeira lagoa de estabilização desativada. Para tanto o lodo da lagoa foi removido e disposto sobre um leito de secagem construído próximo à lagoa, inicialmente por bombeamento e posteriormente com uso de máquinas escavadeiras. O fundo da lagoa foi aterrado com saibro, nivelado e posteriormente recebeu uma camada de argila compactada. O leito foi formado por uma camada de brita com 0,8 m de profundidade. Os 30% iniciais do comprimento do leito foram preenchidos com brita 1 (9,5 – 19,0 mm) correspondendo a uma área de 1.306 m² e um volume de 1.045 m³ e o restante por brita 0 (4,8 – 9,5 mm), correspondendo a uma área de 3.981 m² e um volume de 3.185 m³. Ao redor do banhado foi instalada uma cerca elétrica, que é energizada durante a noite, para evitar que a vegetação seja danificada por animais silvestres.

As espécies de plantas utilizadas no tratamento foram a taboa (*Typha dominguensis*) e o junco (*Scirpus californicus*), sendo que os 30% iniciais do comprimento do banhado foram plantados com taboa a uma densidade de 4 mudas por metro quadrado, enquanto o restante foi plantado com mudas de junco à mesma densidade. O plantio ocorreu no início do mês de dezembro de 2006.

A estrutura de alimentação é formada por uma caixa de concreto com volume aproximado de 1m³ localizada no início do banhado acima do nível do leito, que recebe o efluente do tratamento físico-químico e o distribui através de 4 tubulações com diâmetro de 150 mm em PVC cujas saídas estão espaçadas em 6 m ao longo do comprimento da entrada do banhado.

A estrutura de saída é composta por 4 tubos de PVC com diâmetro de 400 mm perfurados (diâmetro dos orifícios – 12 mm), instalados verticalmente na saída do banhado. O espaçamento entre os tubos é de aproximadamente 6 m ao longo da largura do banhado. No interior de cada

tubo existe outro tubo de PVC, com diâmetro de 150 mm, que fixa o nível na saída do banhado em 0,8 m. Os orifícios no tubo de 400 mm permitem que o efluente escoe para o seu interior sem que haja arraste de britas, enquanto o tubo de 150 mm conduz o líquido transbordante de cada uma das estruturas de saída até uma caixa de concreto com volume aproximado de 1 m³, de onde o efluente segue para o corpo receptor, passando pela calha Parshall, medidora de vazão. A figura 4.2 apresenta a localização das instalações do tratamento.

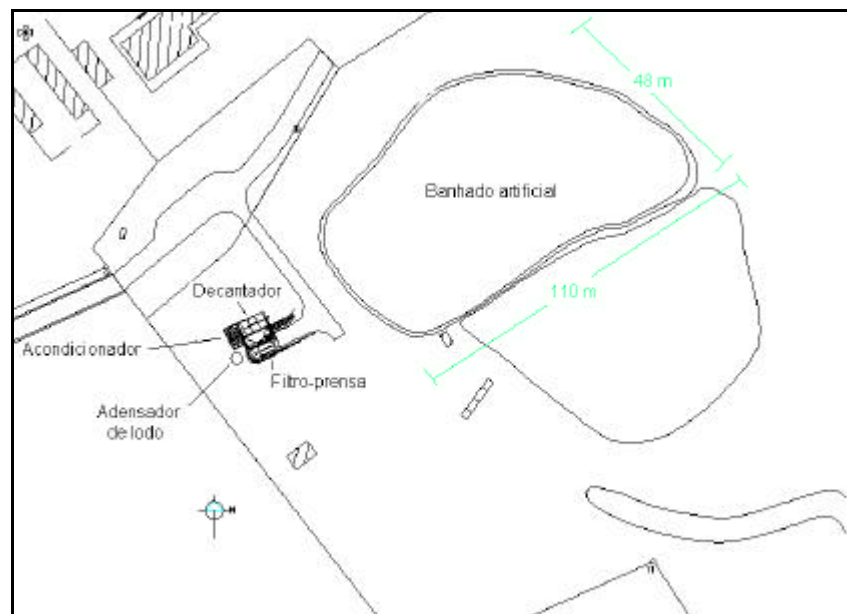


Figura 4.2: Planta de instalação da estação de tratamento de efluentes.

4.3.1 Partida da Unidade

A partida foi dada aumentando-se o nível de líquido até aproximadamente 10 cm acima do nível superior do leito e alimentando o banhado apenas com a água captada de um poço artesiano, em média cinco horas por dia, durante um período aproximado de 20 dias. Nas duas semanas seguintes o efluente do tratamento físico-químico era direcionado para o banhado, diluído com a água do poço, por aproximadamente cinco horas diárias. Posteriormente aumentou-se o tempo de alimentação do banhado com o efluente, passando para 8 horas diárias, mas ainda diluído com a água do poço.

Após esse período de adaptação e desenvolvimento das plantas, enfim, o banhado começou a receber a alimentação de efluente durante as 24 horas do dia, sem a diluição com água.

Nos períodos que o efluente não era direcionado ao banhado, era ele tratado através da segunda lagoa de estabilização do sistema antigo, que foi preservada para esse fim.

4.4 Modelagem Matemática

Com o intuito de verificar o adequado dimensionamento do sistema foi aplicado o modelo matemático descrito por Reed (1993) ao banhado da EPCOS do Brasil.

4.4.1 Balanço Hídrico

O balanço global completo para um sistema de banhado artificial é expresso genericamente pela equação (1):

$$\frac{dV_w}{dt} = Q_0 + Q_c - Q_b - Q_s + (P - ET - I).A_w \quad (1)$$

Onde:

A_w = área da superfície do banhado (m^2),

ET = taxa de evapotranspiração ($m.dia^{-1}$),

I = taxa de infiltração ($m.dia^{-1}$),

P = taxa de precipitação ($m.dia^{-1}$),

Q_b = vazão das perdas através dos diques ($m^3.dia^{-1}$),

Q_c = vazão de acúmulo de águas de escoamento superficial ($m^3.dia^{-1}$),

Q_0 = taxa de alimentação de efluente ($m^3.dia^{-1}$),

Q_s = Taxa de saída de efluente ($m^3.dia^{-1}$),

t = tempo (dia), e

V_w = Volume de líquido armazenado no banhado (m^3).

Alguns dos termos presentes na equação puderam ser negligenciados e serão comentados a seguir.

VAZÃO DE ALIMENTAÇÃO:

A vazão diária de alimentação de efluente é a principal entrada do sistema. Os valores utilizados foram mensurados durante o tempo de operação da bomba de recalque, que é registrado por um horâmetro, multiplicado pela vazão da bomba.

PRECIPITAÇÃO E ÁGUAS DE ESCOAMENTO SUPERFICIAL:

A água da chuva pode ingressar diretamente sobre o banhado, na forma de precipitação (P) ou através do escoamento das águas superficiais do entorno (Q_c). A precipitação dilui poluentes no sistema, temporariamente aumenta o nível de líquido e reduz o tempo médio de retenção. Os efeitos da chuva são normalmente significantes, e, no modelo, foram considerados os dados diários de precipitação na região de Gravataí / RS, enquanto o escoamento superficial foi desprezado, pois o banhado possui sistema de drenagem das águas de escoamento superficial.

EVAPOTRANSPIRAÇÃO:

É a combinação entre as perdas de água por evaporação e pela transpiração da vegetação. A taxa de evapotranspiração concentra os poluentes, reduz temporariamente o nível de líquido e o tempo de retenção. Sua determinação é muito difícil e é assumida como sendo um percentual da taxa de evaporação da quantidade de líquido. Para o desenvolvimento do modelo, a taxa de evapotranspiração foi estimada a partir do balanço hídrico em um dia sem ocorrência de precipitações, haja vista que a vazão de saída foi mensurada através da calha Parshall instalada para medição da vazão efluente e a vazão de entrada mensurada através do horômetro instalado na bomba de recalque.

INFILTRAÇÕES E PERDAS ATRAVÉS DOS DIQUES

As taxas de infiltração I e Q_b foram desconsideradas no modelo aplicado, uma vez que o banhado foi construído sob uma barreira impermeabilizante de argila compactada que assegura o seu isolamento hidráulico.

VAZÃO DE SAÍDA:

Corresponde ao volume de líquido que deixa o banhado no período de um dia. Reflete o balanço entre as entradas do sistema, eventuais ganhos e perdas, e inventário do banhado. A vazão de saída diária foi obtida através do balanço hídrico apresentado na equação (1).

VOLUME DO BANHADO

O volume de líquido no banhado (V_w) é controlado pelas estruturas de saída que estabelecem a altura do nível de líquido na região de saída em 0,8 m. O volume de líquido influencia diretamente o tempo necessário para o efluente escoar através do banhado.

4.4.2 Aplicação do Modelo

Como em qualquer sistema de escoamento por gravidade, o nível de líquido em um banhado FSS é controlado pela elevação da saída e pelo gradiente hidráulico, ou inclinação, que é a queda no nível de líquido desde a entrada até a saída. O nível de água na entrada do banhado irá elevar-se até o nível necessário para vencer a perda de carga ao longo de todo comprimento do leito. A relação entre o escoamento através de um meio poroso e o gradiente hidráulico é tipicamente descrita pela forma geral da lei de Darcy. Para um comprimento de leito definido a relação assume a forma da equação (2). Essa forma assume escoamento laminar através do leito e é suficiente para estimar a elevação do nível de líquido em banhados FSS (USEPA, 2000).

$$dh = \frac{Q_{med} \cdot L}{K \cdot W \cdot D_w} \quad (2)$$

Onde:

Q_{med} = vazão média aritmética entre a entrada e a saída (m^3/dia);

K = condutividade hidráulica ($m^3 \cdot m^{-2} \cdot dia^{-1}$) ou ($m \cdot dia^{-1}$),

W = largura média do leito (m),

= 48,0 m,

D_w = profundidade do líquido (m),

= 0,8 m,

L = comprimento do leito (m),

= 110,0 m

dh = variação no nível do líquido devido à resistência ao escoamento (m).

Para aplicação do modelo foi utilizado um valor de K médio ponderado pela área, pois o leito é formado por materiais de diferentes granulometrias em proporções distintas. Para 30% da área do banhado, formada pelo leito de brita 1, foi aplicado o valor de $K = 10.000 \text{ m}^3 \cdot m^{-2} \cdot dia^{-1}$, enquanto que para os 70% restantes da área, formada por leito de brita 0, o valor empregado foi de $34.000 \text{ m}^3 \cdot m^{-2} \cdot dia^{-1}$. Ponderando em relação às respectivas áreas obteve-se o valor de $K = 27.455 \text{ m}^3 \cdot m^{-2} \cdot dia^{-1}$.

A vazão média empregada nos cálculos foi calculada a partir da vazão de alimentação registrada no dia da coleta de amostras para análise e da vazão de saída calculada pelo balanço hídrico, nos mesmos dias.

Foi empregado um modelo de fluxo pistonado com cinética de primeira ordem baseado na redução de DBO₅, conforme equação (3).

$$\frac{C_s}{C_0} = e^{(-K_T \cdot t)} \quad (3)$$

Onde:

C_0 = concentração de DBO na alimentação (g. m⁻³),

C_s = concentração de DBO na saída do banhado (g. m⁻³),

t = tempo médio de retenção (dia),

K_T = constante cinética de primeira ordem (dia⁻¹).

$$= 1,839 \cdot (37,31 \cdot e^{4,172}) \cdot 1,1^{(T-20)} \text{ (MARQUES, 1999).}$$

e = porosidade do meio,

T = Temperatura ambiente, (°C).

O tempo médio de retenção para um banhado FSS é função da vazão de alimentação e do volume de vazios no banhado, e é expresso pela equação (4).

$$t = \frac{V_w}{Q_{med}} = \frac{e \cdot h \cdot L \cdot W}{Q_{med}} \quad (4)$$

Para aplicação do modelo foi adotado um valor de porosidade médio ponderado pela área. Para 30% da área do banhado foi adotado o valor de $e = 0,40$, enquanto que para os 70% restantes da área o valor adotado foi de $e = 0,30$. Ponderando em relação às respectivas áreas obteve-se o valor de $e = 0,33$. As temperaturas utilizadas foram aquelas registradas na região nos mesmos dias de coleta das amostras para análise. A área transversal foi calculada considerando-se a largura média $W = 48$ m, o comprimento do banhado $L = 110$ m. A altura do nível de líquido adotada foi uma altura média entre a altura na entrada, considerando a elevação calculada pela equação (2) e a altura da saída, estabelecida pelas estruturas de saída ($= 0,8$ m).

Os valores de DBO (na alimentação e na saída do banhado) empregados foram aqueles fornecidos pela análise de amostras compostas coletadas para esse fim. Os efeitos da diluição

provocada pela chuva e da concentração provocada pela evapotranspiração foram considerados através da equação (5).

$$C_{cor} = \frac{C_0 \cdot Q_0}{Q_{med}} \quad (5)$$

Onde,

C_{cor} = DBO considerando os efeitos de concentração e diluição ($g \cdot m^{-3}$).

Os cálculos foram realizados utilizando-se o Microsoft Excel 2000®. Os resultados são apresentados e comparados aos valores reais do banhado na figura 4.3.

A tabela 4.3 apresenta um resumo das considerações adotadas na aplicação do modelo.

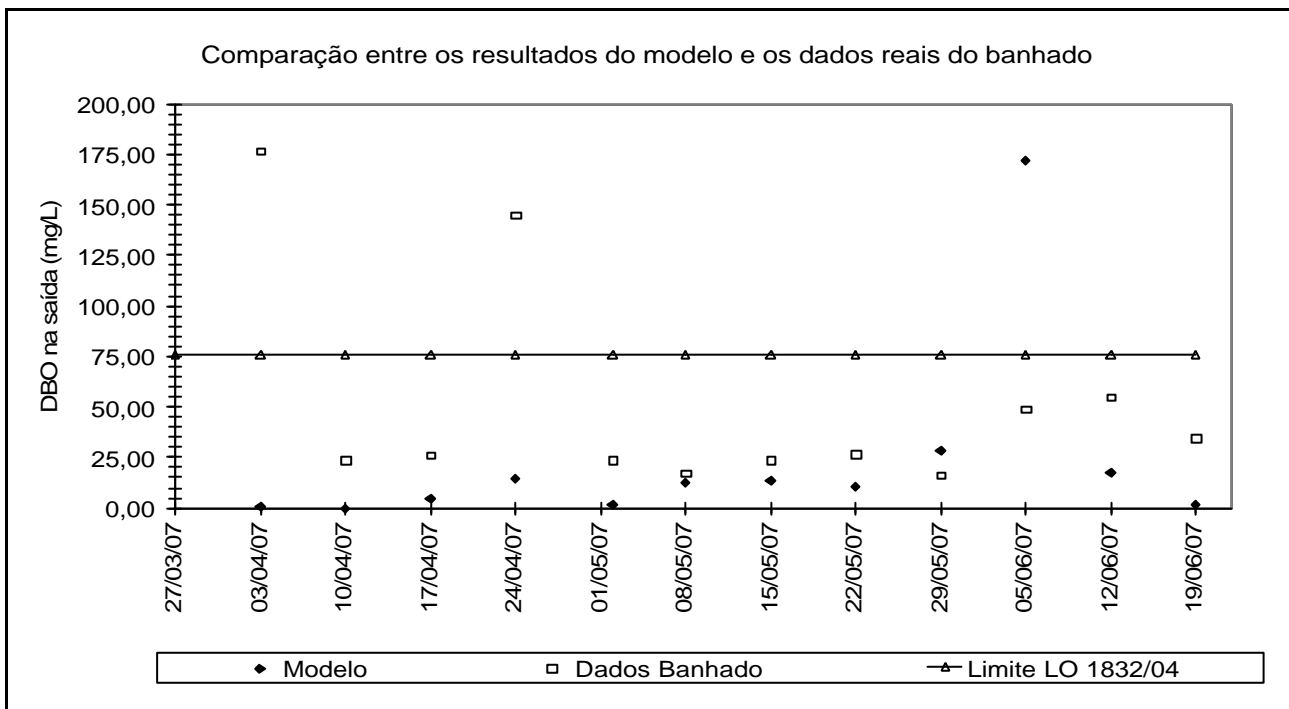


Figura 4.3: Comparação entre os dados obtidos com a aplicação do modelo e os dados reais.

Tabela 4.3: Quadro resumo das considerações adotadas na aplicação do modelo.

Parâmetro	Consideração
Vazão da alimentação	Tempo de funcionamento da bomba multiplicado pela sua vazão máxima.
Taxas de infiltração	Desprezadas considerando-se a impermeabilização perfeita do banhado.
Taxa de precipitação	Valores registrados pela Defesa Civil do RS em Gravataí / RS nos dias de coleta de amostras para análise do efluente.

Taxa de evapotranspiração	Considerada constante, igual a $0,0104 \text{ m.dia}^{-1}$.
Vazões	Consideradas as vazões médias aritméticas entre as vazões de alimentação e a vazões de saída em cada dia.
Nível do líquido	Adotado o valor médio entre o nível da entrada em cada dia, considerando-se a elevação e o nível da saída, supondo declividade linear.
Temperaturas	Valores médios diários registrados na região da Gravataí / RS nos dias de realização de coleta (THE WEATHER CHANNEL).
Porosidade e condutividade hidráulica	Adotados os valores da literatura, ponderados pelo percentual de área ocupado por cada tipo de recheio do leito.
Diluição e concentração dos contaminantes	Correção do valor de DBO através da aplicação da equação (5).

4.5 Custos de Implantação

Os custos do projeto implantado na EPCOS do Brasil são apresentados na tabela 4.4.

Tabela 4.4: Custos de implantação do banhado artificial na EPCOS do Brasil.

Item	Custo absoluto	Custo (%)
Preparação das estruturas (remoção de lodo, estradas, conserto de equipamentos, mão-de-obra)	R\$ 33.232,46	7,83
Impermeabilização do banhado (argila, máquinas)	R\$ 82.103,98	19,33
Leito (brita, máquinas)	R\$ 186.801,00	44,00
Plantas	R\$ 13.400,00	3,15
Equipamentos (bombas, filtro-prensa, adensador de lodo, adequação no decantador de concreto)	R\$ 85.600,00	20,16
Tubulações e conexões	R\$ 11.880,86	2,80
Outros	R\$ 11.610,00	2,73
Total	R\$ 424.628,30	100,00

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Entre os problemas associados a esse tipo de sistema citados por USEPA (1999) foi observado a necessidade de uma fonte alternativa de suplemento de água, especialmente durante a partida do sistema, período em que as plantas se ambientam às alterações severas que ocorrem no meio. Esse problema pode ser contornado pois havia uma fonte disponível para captação de água de boa qualidade, mas poderia inviabilizar a implantação do sistema em locais onde isso não ocorra.

A pouca demanda por intervenções operacionais e de manutenção também merecem destaque, sendo que estas se resumem às inspeções nas condições das instalações e plantas, eventuais intervenções para controle de invasão por espécies daninhas e do nível do banhado e controle da qualidade do efluente tratado.

A grande demanda por área não significou dificuldade na implantação do sistema, uma vez que ele foi construído aproveitando-se a estrutura da lagoa de estabilização antigamente empregada para o tratamento de efluentes, ocupando a mesma área.

O monitoramento da qualidade do efluente final no banhado e da eficiência do tratamento é feito por meio de análises químicas realizadas por laboratório externo, credenciado pela FEPAM, conforme a LO da EPCOS N° 1832/2004. Na figura 5.1 são apresentadas as eficiências de remoção de poluentes pelo banhado estudado.

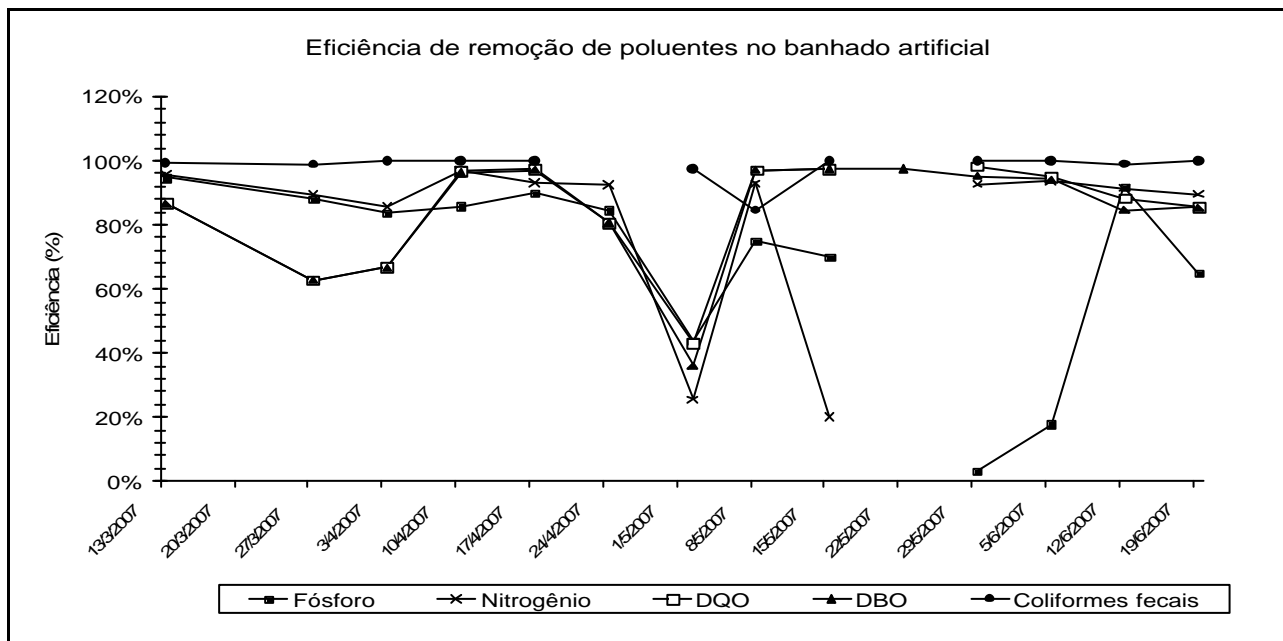


Figura 5.1: Eficiências de remoção de poluentes pelo banhado artificial da EPCOS.

O emprego do banhado artificial na empresa EPCOS do Brasil destacou-se por apresentar boa eficiência na remoção de DBO, DQO, nitrogênio, fósforo, e coliformes fecais, mesmo sob alterações nas condições ambientais. As eficiências de remoção médias para os parâmetros citados foram respectivamente 84,21%, 84,36%, 81,55%, 68,67 e 98,28%.

Observando-se a figura 5.1, identifica-se uma queda acentuada na eficiência de remoção de todos os parâmetros avaliados (DBO, DQO, N, P e coliformes fecais) no dia 15/05/07. Esse dia foi aquele onde as maiores taxas de precipitação em dia de coleta de amostras foram observadas, indicando que a chuva possa interferir negativamente no desempenho do banhado.

No dia 22/05/2007 não foram realizadas algumas análises pois nesse dia ocorreram alterações no processo que resultaram no descarte imprevisto das soluções utilizadas nos banhos de pré-oxidação. A baixa eficiência na remoção de fósforo apresentada no dia 29/05/2007 pode ainda estar associada a esse fato.

A tabela 5.1 apresenta possíveis justificativas para a seleção das características construtivas adotadas no projeto do banhado implantado na EPCOS do Brasil.

Tabela 5.1: Avaliação dos parâmetros adotados no projeto.

Característica	Descrição	Comentários
Tipo de sistema	Subsuperficial	Segundo USEPA (1999) fornecem maior tolerância a baixas temperaturas, e maior potencial de assimilação por unidade de área que em sistemas SF. Outra possibilidade a minimização de pestes e problemas com odores, uma vez que o banhado está localizado junto à planta industrial e próximo a residências.
Estruturas de alimentação	de Caixa em concreto com quatro tubos de distribuição com saídas espaçada a cada seis metros	USEPA (2000) recomenda que a distribuição seja feita a uma distância aproximadamente igual a 10% da largura do banhado. O sistema exposto permite o acesso do operador para ajustes e manutenção em caso de bloqueios e/ou avarias.
Saída	Quatro tubos verticais com tubos internos removíveis instalados a cada seis metros ao longo do comprimento na saída.	Segundo USEPA (2000) o espaçamento preferencial deve ser entre 5-10m, construído sob os mesmos princípios hidráulicos usados na alimentação. A possibilidade de remoção do tubo interno permite que o nível seja reduzido quando necessário.
Plantas	Espécies do gênero <i>Typha</i> e <i>Scirpus</i> .	Plantas aquáticas emergentes, pereniais, naturalmente presentes na região, que suportam altas concentrações de nutrientes e variações na altura da coluna de líquido. Formam uma densa cobertura vegetal relativamente rápido. Ainda, são gêneros

		extensamente empregados em banhados em vários países.
Tipo e tamanho do material do leito	30 % iniciais – Brita 1 70% finais – Brita 0	Alta carga de nutrientes presente no efluente permite a utilização da brita como material para o leito. Leitos de brita fornecem boa estrutura para fixação das plantas e menor resistência hidráulica ao escoamento que leitos de areia. Tamanhos de partícula entre 20 e 30 mm permitem o desenvolvimento adequado das raízes e seu espalhamento.
Cercamento	Fio energizado instalado ao redor do banhado	Cerca elétrica utilizada para evitar o acesso de animais selvagens às plantas.
Pré-tratamento	Tratamento físico-químico com adição de flocculante orgânico, coagulação, floculação e recolhimento do lodo gerado.	O efluente bruto da empresa possui elevada carga orgânica e sólidos suspensos, fato que geraria bloqueios no leito na região de entrada. Empregando-se o pré-tratamento a ocorrência de escoamento superficial devido à obstrução do meio é evitada, a eficiência do tratamento é melhorada e a vida útil do banhado elevada.

O plantio realizado no início do mês de dezembro/06, e o procedimento de ambientação das plantas, por meio da dosagem progressiva de efluente possibilitou um bom desenvolvimento das mesmas, fato esse observado através das altas eficiências de remoção obtidas já a partir do quarto mês após o plantio.

Observa-se que o tratamento físico-químico empregado promove redução média de 22,05% da DBO, 74,59% dos sólidos suspensos, 24,28% de nitrogênio e 16,69% de fósforo, o que segundo Caselles-Osorio e Garcia (2006) aumentaria significativamente o tempo de vida do banhado, além de contribuir com a eficiência global do tratamento de efluentes.

Foi observado escoamento superficial em algumas ocasiões, próximos à região de entrada, muito provavelmente causado pelo gradiente hidráulico. A colocação superficial de brita adicional contornaria o problema, mantendo a superfície do leito sempre seca.

A taboa plantada no local atraiu ratões-do-banhado (*Myocastor coypus*) que a utilizavam como alimentação, especialmente durante o período noturno. A predação pelos ratões significou perdas significativas de mudas que precisaram ser replantadas. A instalação de um fio metálico energizado ao redor do banhado se mostrou eficiente no controle dos problemas causados por roedores selvagens.

As estruturas de saída permitem que o tubo interno seja retirado para realização de drenagens parciais, porém a retirada de um dos tubos aumenta significativamente a vazão nas

proximidades da estrutura, o que pode causar a formação de caminhos preferenciais naquela região, reduzindo o tempo médio de retenção e conseqüentemente a eficiência do tratamento. A instalação de sistemas de ajuste do nível permitiria contornar esse problema.

O modelo matemático aplicado conduziu a resultados com desvios percentuais elevados em relação ao valor real de DBO no banhado. Porém, observou-se que esses desvios apresentaram certa regularidade e um ajuste nos parâmetros adotados poderia conduzir a resultados que permitam uma boa previsibilidade. Todavia, não é o objetivo deste trabalho o ajuste dos parâmetros do modelo. Outro fator importante negligenciado no modelo foi a atividade microbiana, grande responsável pelas transformações em banhados e que é sensivelmente afetada por alterações no meio.

Quanto ao custo total associado à implantação do banhado é importante destacar o percentual representado pelo custo do material do leito (44 % do custo total da obra). Esse alto custo percentual associado ao material do leito justifica a realização de pesquisas para desenvolvimento de leitos formados por materiais mais baratos ou reutilizados como por exemplo resíduos.

O banhado se mostrou energeticamente sustentável. Os custos operacionais significativos estão apenas relacionados ao pré-tratamento, correspondendo à energia utilizada pelas bombas e equipamentos, ao consumo do produto coagulante e à mão-de-obra empregada na operação manual do filtro-prensa.

Houve episódios de violação dos parâmetros DBO, nos dias 03/04/2007 e 24/04/2007, e do parâmetro fósforo nos 15/05/2007 e 05/06/2007. Todavia, não foi encontrada qualquer relação entre essas ocorrências e picos na vazão de alimentação, picos na carga ou ocorrência de precipitações.

Analisando a figura 5.2 percebe-se que há relação entre os valores DBO na saída do banhado e os valores de vazão de alimentação.

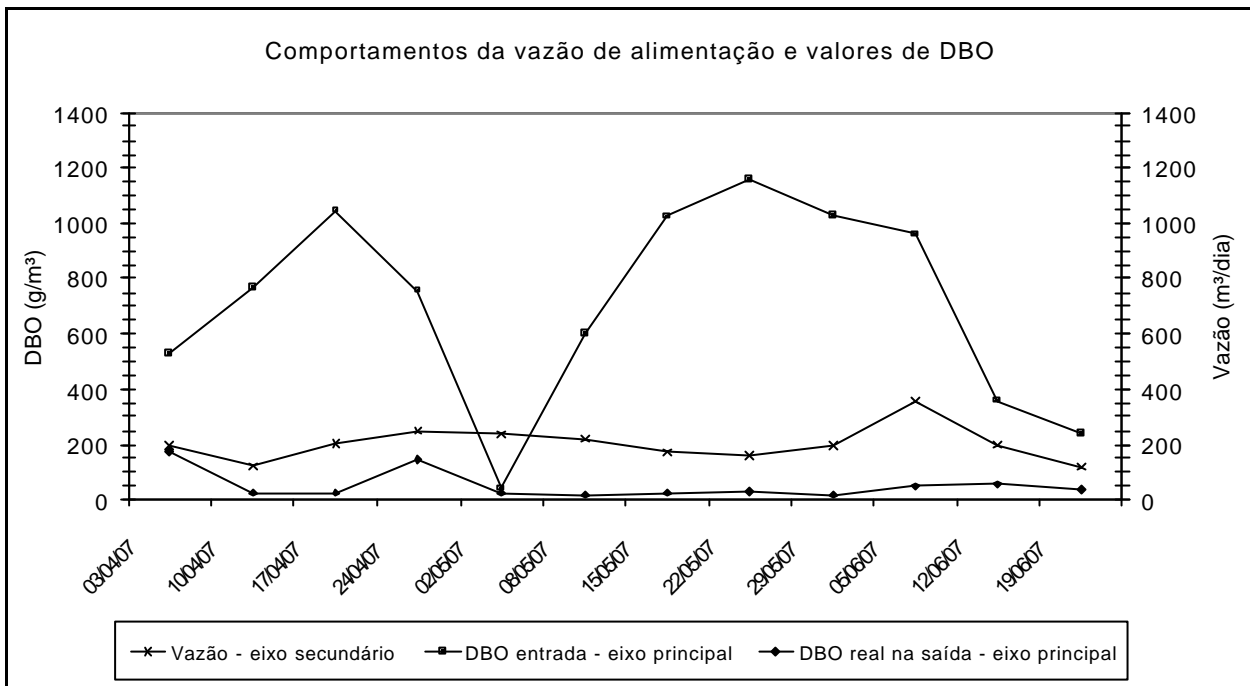


Figura 5.2: Vazão e concentrações de DBO na entrada e saída do banhado estudado.

Por fim, observa-se que o banhado está apropriadamente dimensionado, uma vez que mesmo em condições de elevadas vazões de alimentação associadas às elevadas concentrações de matéria orgânica na alimentação (alta carga) o banhado responde satisfatoriamente, apresentando boa qualidade no efluente final.

6 CONCLUSÕES

A associação das atividades humanas às funções naturalmente presentes em banhados é muito conveniente para o tratamento de efluentes líquidos industriais e sanitários e contribui para a preservação e melhoria da qualidade ambiental, de maneira sustentável e economicamente viável.

A fundamental diferença entre sistemas convencionais e sistemas naturais é que nos primeiros, o efluente é tratado rapidamente em ambientes altamente controlados e que requerem extensa quantidade de energia (por exemplo, reatores); por outro lado, em sistemas naturais de tratamento as taxas de conversão são relativamente menores e ocorrem em ambientes naturais não controlados. Podem ainda ser citados como vantagens a aparência, a simplicidade dos procedimentos de manutenção e operação e construção, menores custos iniciais e operacionais relativos.

O emprego de banhados artificiais de fluxo subsuperficial no tratamento de efluentes com alta carga orgânica é uma alternativa que fornece resultados satisfatórios na remoção de DBO, DQO, SS, nitrogênio, fósforos e coliformes fecais.

A redução de poluentes em um banhado artificial depende de um correto dimensionamento, construção, operação e manutenção do sistema. Os principais parâmetros do projeto devem ser estimados em função de fatores como as características do efluente bruto, vazões e cargas, qualidade do efluente final desejada, área disponível, condições do terreno, existência de fonte alternativa de água, proximidade às zonas urbanas, histórico de temperaturas e precipitações pluviométricas da região e espécies de plantas adequadas àquela região específica.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Alguns pontos de interesse que não foram abordados no presente trabalho ficam como sugestão para a realização de trabalhos futuros. São eles:

- Estudo da sensibilidade paramétrica do modelo aplicado;
- Investigação de materiais alternativos a serem empregados como suporte em sistemas de fluxo subsuperficial;
- Aplicação de modelos matemáticos que considerem as conversões bioquímicas dos contaminantes;
- Investigação dos efeitos de sazonalidade em banhados artificiais;
- Projeto de estruturas de saída com altura ajustável.
- Design de sistemas de reuso do efluente tratado por banhados artificiais.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ADLER, P.R., et al. *Evaluation of a wetland system designed to meet stringent phosphorus discharge requirements*. **Water Environment Research**. v. 68, p. 836–840, 1996.
2. BLAZEJEWSKI, R., MURAT-BLAZEJEWSKA, S., *Soil clogging phenomena in constructed wetlands with subsurface-flow*. **Water Science and Technology**. v. 35 (5), p. 183-88, 1997 apud CASELLES-OSORIO, A., GARCIA, J., *Effect of physico-chemical pretreatment on the removal efficiency of horizontal subsurface-flow constructed wetland*. **Environmental Pollution**. v. 146, p. 55-63, 2006.
3. BRASIL. Resolução CONAMA n. 357 de 17 de março de 2005. D.O.U de 18 de março de 2005.
4. CASELLES-OSORIO, A., GARCIA, J., *Effect of physico-chemical pretreatment on the removal efficiency of horizontal subsurface-flow constructed wetland*. **Environmental Pollution** v. 146, p. 55-63, 2006.
5. CHEN, T. Y., KAO C. M., YEH T. Y., CHIEN H. Y., CHAO A.C., *Application of constructed wetland for industrial wastewater treatment: a pilot-scale study*. **Chemosphere**, v. 64, p. 497-502, 2006.
6. DEFESA CIVIL DO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL. Consulta de índices pluviométricos por período e município. Disponível em <http://www2.defesacivil.rs.gov.br/estatistica/pluviometro_consulta.asp>. Acessado em: jun. 2007.
7. ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL. Resolução CONSEMA n. 128 de 24 de novembro de 2006. D.O.E de 07 de dezembro de 2006.
8. FLECK, E., **Sistema integrado por filtro anaeróbio, filtro biológico de baixa taxa e banhado construído aplicado ao tratamento de lixiviado de aterro sanitário**. 2003, 176 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, UFRGS, Porto Alegre.
9. LIU, J., DONG, Y., XU, H., WANG, D., XU, J.. *Accumulation of Cd, Pb and Zn by 19 wetland plant species in constructed wetland*. **Journal of Hazardous Materials**. Article in press, Jan. 2007.

10. MARQUES, D. M., *Terras úmidas construídas de fluxo subsuperficial*. In: CAMPOS, J.R. **Tratamento de Esgotos Sanitários por Processos Anaeróbio e disposição Controlada no Solo**. PROSAB/ABES, Rio de Janeiro, p. 409-35, 1999.
11. PASTOR, R., BENQLILOU, C., PAZ, D., CARDENAS, G., ESPUÑA, A., PUIGJANER L. *Design optimization of constructed wetlands for wastewater treatment*. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 37, p. 193-204, 2003.
12. REED, C. S, **Subsurface flow constructed wetlands for wastewater treatment - A Technology Assessment**. United States Environmental Protection Agency, Office of Water, EPA-832-R-93-008, p. 79, 1993.
13. TANNER, C. C., SUKIAS J. P., *Accumulation of organic solids on gravel-bed constructed wetlands*. **Water Science and Technology**. v. 32 (3), p. 229-39, 1995 apud CASELLES-OSORIO, A., GARCIA, J., *Effect of physico-chemical pretreatment on the removal efficiency of horizontal subsurface-flow constructed wetland*. **Environmental Pollution** v. 146, p. 55-63, 2006.
14. TANNER, C.C., CHAMPION, P. D., KLOOSTERMAN, V., *New Zealand Constructed Wetland Planting Guidelines*. National Institute of Water and Atmospheric Research reported published in association with the New Zealand Water and Wastes Association, 2006.
15. THE WEATHER CHANNEL. Médias e registros mensais de temperatura. Disponível em <<http://br.weather.com/weather/local/BRXX0186>>. Acessado em: jun. 2007.
16. USEPA. **A handbook of constructed wetlands. a guide to creating wetlands for agricultural wastewater, domestic wastewater, coal mine drainage, stormwater**. 3rd. ed. v. 1, USDA – Natural Resources Conservation Service and the US Environmental Protection Agency, 1999.
17. USEPA. **Constructed Wetlands Treatment of Municipal Wastewaters**, Office of Research and Development, Cincinnati, Ohio, EPA/65/R-99/010, 165 p, 2000.
18. VRHOVSEK, D., KUKANJA, V., BULC, T. *Constructed wetland (CW) for industrial waste water treatment*. **Water Research**. v. 30, p. 2287-92, 1996.
19. WAND, H., VACCA G., KUSCHK P., KRÜGER, M., KÄSTNER, M. Removal of bacteria by filtration in planted and non-planted sand columns. **Water Research**. v. 41, p. 159-67, 2007.

20. YANG, L., YANG L., CHANG, H., HUANG, M. Nutrient removal in gravel- and soil-based wetland microcosms with and without vegetation. **Ecological Engineering**. v.18, p. 91-105, 2001.