



# MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE UNIDADE DE TRATAMENTO TERCIÁRIO DE EFLUENTE DE REFINARIA VISANDO AO REÚSO

Gabriel Tenenbaum de Oliveira

## PROJETO FINAL DE CURSO

### Orientadores

Prof. Carlos Augusto G. Perlingeiro, D.Sc.

Prof.<sup>a</sup> Lídia Yokoyama, D.Sc.

Junho de 2013

# MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE UNIDADE DE TRATAMENTO TERCIÁRIO DE EFLUENTE DE REFINARIA VISANDO AO REÚSO

*Gabriel Tenenbaum de Oliveira*

Projeto de Final de Curso submetido ao Corpo Docente da Escola de Química, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Engenheiro Químico.

Aprovado por:

---

Priscilla Lopes Florido, D. Sc.

---

Ana Cláudia F. P. de Cerqueira, D. Sc.

---

Prof. Carlos André Vaz Junior, D. Sc.

Orientado por:

---

Prof. Carlos Augusto G. Perlingeiro, D.Sc.

---

Prof.<sup>a</sup> Lídia Yokoyama, D.Sc.

Rio de Janeiro, RJ – BRASIL  
Junho de 2013

Tenenbaum de Oliveira, Gabriel.

Modelagem e Simulação de Unidade de Tratamento Terciário de Efluente de Refinaria visando ao Reúso /

Gabriel Tenenbaum de Oliveira. Rio de Janeiro: UFRJ/EQ, 2013.

viii, 53 p., Anexo 24 p.

(Projeto Final) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, 2013.

Orientadores:

Prof. Carlos Augusto G. Perlingeiro e Prof.<sup>a</sup> Lídia Yokoyama.

1. Simulação 2. Reúso de Efluente de Refinaria 3. Tratamento Terciário 6. Projeto Final (Graduação – UFRJ/EQ) 7. Carlos Augusto G. Perlingeiro 8. Lídia Yokoyama  
I. Modelagem e Simulação de Unidade de Tratamento Terciário de Efluente de Refinaria visando ao Reúso.

"We will only know the worth of water when the well is dry."  
Benjamin Franklin

## AGRADECIMENTOS

Agradeço à vida, por ter criado emocionantemente todos os elementos químicos e, por alguma reação ainda a descobrir, ter-me proporcionado a emoção maior de vivê-la.

Agradeço à água por sua inspiradora e excelsa simplicidade, por ter ajudado todas as formas vivas a galgar seus momentos e por ter chegado até aqui ainda sendo essencial a todas elas.

Agradeço a minha família, por ter me suportado em todos os devaneios e ter incentivado inclusive o maior deles, graduar-me em Engenharia Química.

Agradeço aos amigos, que me acompanharam dentro e fora d'água.

Agradeço à Engenharia Química, por ter me mostrado despretensiosamente cursos diversos aonde navegar e aos professores por terem me passado o controle do leme.

Química, obrigado por tudo, mas estas águas, quando passadas, já não moverão seus moinhos.

Resumo do Projeto Final apresentado à Escola de Química como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Engenheiro Químico.

## MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE UNIDADE DE TRATAMENTO TERCIÁRIO DE EFLUENTE DE REFINARIA VISANDO AO REÚSO

Gabriel Tenenbaum de Oliveira

Junho, 2013

### Orientadores:

Carlos Augusto G. Perlingeiro, D.Sc.  
Lídia Yokoyama, D. Sc.

### Resumo:

A água é um recurso que, embora presente em grande quantidade na superfície terrestre tem distribuição espacial desigual e disponibilidade limitada. Nas indústrias, assim como nos outros setores de atividade, visando-se diminuir a dependência, a prática de reúso vem ganhando expressividade. Em refinarias, o reúso tem grande aplicação na reposição de água no sistema de resfriamento, onde está concentrada a maior parte do recurso. Para a reposição, a água deve atender a uma qualidade de pureza relativamente alta, a fim de se evitar a formação de incrustações, depósitos e outros problemas no sistema de resfriamento. Com esse objetivo, além dos tratamentos primário e secundário geralmente existentes, é instituído um tratamento terciário, que realiza a adequação final ao reúso. Na Refinaria Gabriel Passos, da PETROBRAS, esse tratamento terciário é constituído de uma etapa de clarificação avançada seguida de filtração em areia, de uma filtração em carvão ativado granular e de uma etapa de eletrodialise reversa. Este trabalho se propôs a modelar o comportamento do processo existente naquela refinaria. A modelagem se baseou em uma análise individual dos equipamentos e utilizou dados de 2010 a 2012 do monitoramento analítico da própria refinaria e do CENPES. O modelo foi gerado em Excel e programado em VBA e permite, com a definição de dados de entrada e de operação, determinar a qualidade da água tratada final. O modelo se mostrou congruente à realidade e permitiu determinar os valores de entrada dos parâmetros no sistema que atendem, na saída, os limites impostos. De uma maneira geral, o processo já operante se mostrou adequado ao papel desempenhado, mas deve-se atentar a altas concentrações de DBO, DQO e Amônia na entrada do tratamento terciário para evitar *biofouling* e corrosão de ligas de cobre no sistema de resfriamento.

## ÍNDICE

<b>I. Introdução, Objetivo e Motivação</b> .....	<b>1</b>
<b>1. Introdução</b> .....	<b>1</b>
<b>2. Objetivo</b> .....	<b>3</b>
<b>3. Motivação</b> .....	<b>3</b>
<b>II. Revisão Bibliográfica</b> .....	<b>4</b>
<b>1. A Água e seus Parâmetros de Qualidade</b> .....	<b>4</b>
<b>2. A Refinaria de Petróleo e seus Efluentes</b> .....	<b>5</b>
<b>3. O Reúso em Sistemas de Resfriamento</b> .....	<b>6</b>
3.1. O Reúso .....	6
3.2. A Água de Resfriamento e a Torre de Resfriamento.....	7
<b>4. A Dessalinização e a Eletrodialise Reversa</b> .....	<b>10</b>
4.1. A Dessalinização de águas.....	10
4.2. Comparativo entre Eletrodialise Reversa e Osmose Inversa .....	11
4.3. A Eletrodialise Reversa e suas Características .....	12
<b>III. O Processo de Tratamento Terciário da REGAP</b> .....	<b>16</b>
<b>1. A REGAP e o Processo de Tratamento de Efluentes existente</b> .....	<b>16</b>
<b>2. Processo de Tratamento Terciário de Efluentes da REGAP</b> .....	<b>18</b>
2.1. Clarificação Avançada e Filtração em Areia: .....	19
2.2. Adsorção em filtro de Carvão Ativado (CAG).....	21
2.3. Eletrodialise Reversa .....	24
<b>IV. Modelagem e Simulação do Tratamento Terciário</b> .....	<b>27</b>
<b>1. Modelagem do Tratamento Terciário</b> .....	<b>27</b>
1.1. Clarificação Avançada e Filtro de Areia.....	28
1.2. Filtro de Carvão Ativado Granular .....	32
1.3. Eletrodialise Reversa .....	33
1.4. Balanço de Informação do Modelo.....	35
<b>2. Simulação do Tratamento Terciário</b> .....	<b>40</b>
2.1. Inicialização do Modelo .....	40
2.2. Simulação do Tratamento com Valores Históricos Médios .....	44
2.3. Obtenção de Valores Limites de Entrada via Simulação .....	48
<b>V. Conclusão e Sugestões</b> .....	<b>51</b>
<b>VI. Bibliografia</b> .....	<b>53</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Distribuição dos recursos hídricos e do Consumo de água no mundo.....	1
Figura 2. Circuito Semiaberto de recirculação de água da REGAP .....	8
Figura 3. Esquema de fluxo de íons na Eletrodialise com reversão de polaridade .....	13
Figura 4. Esquema detalhado de Unidade de Eletrodialise Reversa .....	13
Figura 5. Esquema representativo de Membranas Catiônicas e Aniônicas.....	14
Figura 6. Vista aérea do parque petroquímico da REGAP .....	16
Figura 7. Unidades de Destilação, Craqueamento, Coqueamento e Hidrotratamento .....	16
Figura 8. Tratamento Primário de Efluentes Hídricos: Separação água/óleo e Flotação .....	17
Figura 9. Tratamento Secundário: Bacias de Aeração e Biodiscos (detalhe do Biofilme).....	17
Figura 10. Fluxograma do Processo de Tratamento Terciário para Reúso da REGAP.....	18
Figura 11. Esquema Clarificação Avançada Actiflo®.....	20
Figura 12. Microporo de um carvão ativado e Filtros de Carvão em série na REGAP .....	22
Figura 13. Unidade GE 2020 fornecida pela GE Water & Process Technologies .....	24
Figura 14. Modelagem Actiflo® + Filtro de Areia.....	28
Figura 15. Modelagem Filtro Adsorvedor de Carvão.....	32
Figura 16. Modelagem Eletrodialise Reversa .....	34
Figura 17. Etapa 1 de Simulação do Tratamento: Especificação de variáveis .....	41
Figura 18. Etapa 2 de Simulação do Tratamento: Cálculo de Variáveis.....	42
Figura 19. Etapa 2 de Simulação do Tratamento: Acompanhamento Paramétrico Zerado .....	43
Figura 20. Etapa 2 de Simulação do Tratamento: Valores Históricos Médios de Entrada... ..	44

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1. Consumo médio de água em diferentes indústrias.....	2
Tabela 2. Composição média dos efluentes de uma refinaria .....	6
Tabela 3. Recomendações para Água de Reposição de Sistemas de Resfriamento.....	10
Tabela 4. Comparativo de Limites Paramétricos EDR x OI .....	11
Tabela 5. Remoção paramétrica pós-Clarificação & Filtro de Areia.....	21
Tabela 6. Remoção paramétrica pós-Filtro de Carvão.....	22
Tabela 7. Adequação do efluente tratado à Eletrodialise Reversa .....	24
Tabela 8. Remoção paramétrica no Clarificado pós-Eletrodialise Reversa.....	25
Tabela 9. Adequação da água de reúso final à Torre de Resfriamento .....	26
Tabela 10. Conjunto de Equações de Modelagem para o Processo de Tratamento .....	36
Tabela 11. Parâmetro Físico e Variáveis Especificadas com Valores Industriais .....	38
Tabela 12. Variáveis Especificadas do Processo .....	38
Tabela 13. Variáveis Calculadas do Processo .....	39
Tabela 14. Simulação para Valores Históricos Médios e potenciais Não Conformidades.....	45
Tabela 15. Comparativo entre Resultado da Simulação e Análises de Laboratório.....	46
Tabela 16. Comparação Simulação x Real - caso Menos Favorável .....	47
Tabela 17. Comparação Simulação x Real - caso Mais Favorável .....	47
Tabela 18. Valores de Entrada no sistema para atendimento aos Limites .....	49
Tabela 19. Margem de Segurança do Tratamento.....	49

## LISTA DE SÍMBOLOS

A	Unidade de medida de intensidade de corrente elétrica, Ampère
C	Concentração de uma substância, em mg/L ou g/L
CAG	Carvão Ativado Granular
COT	Carbono Orgânico Total
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DQO	Demanda Química de Oxigênio
EDR	Eletrodiálise Reversa
FM	Fluxo Mássico, em g/L ou kg/L
NTU	Unidade nefelométrica de turbidez
O&G	Óleos e Graxas
OI	Osmose inversa
ppm	Partes por milhão, unidade de concentração de um composto em uma solução aquosa, equivalente a mg/L ou g/m <sup>3</sup>
Q	Vazão, em m <sup>3</sup> /h ou L/h
REGAP	Refinaria Gabriel Passos
S	Unidade do Sistema Internacional de Unidades de medida da condutância elétrica
SDT	Sólidos dissolvidos totais
SST	Sólidos Suspensos totais
TRH	Tempo de Residência Hidráulica, em minutos
V	Unidade de medida de diferença de potencial elétrico entre dois pontos distintos, em Volts
W	Unidade de medida de potência (elétrica), Watts
$\rho$	Massa específica, em g/cm <sup>3</sup> ou kg/m <sup>3</sup>

## FATORES DE CONVERSÃO:

1 m<sup>3</sup> = 6,289 bbl (barril de petróleo) – Fonte: Atlas de Energia Elétrica do Brasil  
1 bbl = 0,159 m<sup>3</sup>

# I. INTRODUÇÃO, OBJETIVO E MOTIVAÇÃO

## 1. Introdução

Segundo diversas teorias de origem da vida, o surgimento de moléculas orgânicas se deu em meio aquoso. Esse fato pode explicar a dependência de todos os seres vivos em relação à água para seu metabolismo.

Nota-se, em decorrência disso que, historicamente, o ser humano primitivo estava em permanente busca por locais com suposta abundância de água (MANCUSO, 2003). Com a evolução da vida em sociedade, a água passou a ser não somente um bem para consumo próprio e teve seu uso estendido para a religião, limpeza, higiene e inclusive outras atividades como a agricultura e pecuária. Não surpreendente que seu papel na indústria seja igualmente importante.

O volume total de água presente na Terra é de  $1,4 \cdot 10^{18} \text{ m}^3$ , porém apenas 2,5% desse total é doce, ou seja  $35 \cdot 10^{15} \text{ m}^3$ . Da parcela de água doce, 68,9% se encontram nas geleiras, calotas polares ou regiões montanhosas, 29,9% em mananciais subterrâneos, 0,9% compõem a umidade do solo e dos pântanos e apenas 0,3% constituem lagos e rios. A água doce disponível para suprir a demanda de ecossistema e dos humanos é de menos de 1% do total de águas doces do planeta (Figura 1) (UN-Water, 2012).

Atualmente, segundo a ONU, um terço da população mundial vive em países em situação de estresse hídrico e a Organização declarou 2013 como o Ano Internacional da Cooperação pela Água. Para agravar a situação, de acordo com a UN-Water, coordenação da ONU especializada em problemáticas ligadas à água, o consumo de água cresceu, no século passado, a uma taxa maior do que o dobro da taxa de crescimento populacional. Do consumo mundial, a irrigação é responsável por 70% do total, a indústria por 22% e 8% é destinado ao uso doméstico. (UN-Water, 2012)



Figura 1. Distribuição dos recursos hídricos e do Consumo de água no mundo  
Fonte: Ministério do Meio Ambiente & Elaboração própria a partir de ONU

Apesar de as penúrias afetarem um número crescente de países e regiões, o estoque de água doce é muitas vezes superior à quantidade necessária para a população atual do planeta. O problema surge, então, da distribuição desigual da precipitação e do mau uso que se faz da água captada (MANCUSO, 2003). Dados do Instituto Trata Brasil revelam uma significativa ineficiência dos sistemas de abastecimento de água no Brasil: a cada 100 litros produzidos, 36 são perdidos, seja

por vazamentos, seja por falta de faturamento. Para grandes indústrias, a água representa um desafio operacional, um custo e uma oportunidade de crescimento.

Desde o meio do século XX, os diferentes setores da indústria aumentaram a eficiência da gestão da água através de grandes melhoras em seus processos. Na Tabela 1 é possível conferir alguns valores médios de consumo industrial. No entanto, para se atingir uma otimização de custos, qualidade e quantidade é necessário o desenvolvimento de uma gestão integrada de seus processos. Um dos recursos promissores da gestão integrada da água é a reutilização de águas residuárias (reúso).

*Tabela 1. Consumo médio de água em diferentes indústrias*  
*Fonte: adaptado de (BARTH, 1987) e (MANCUSO, 2003)*

Tipo de Indústria	Consumo
Refino de Petróleo	290 m <sup>3</sup> /barril refinado (bbl)
Laminação de Aço	85 m <sup>3</sup> /ton de aço
Indústria Têxtil	1.000 m <sup>3</sup> /ton de tecido
Indústria Papeleira	30 a 250 m <sup>3</sup> /ton de papel
Cervejaria	20 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> de cerveja

O termo “água de reúso” passou a ser utilizado com maior frequência na década de 1980, quando as águas de abastecimento foram se tornando cada vez mais onerosas. Como o preço do produto, ao lado da sua qualidade, é fator determinante para o sucesso de uma empresa, a indústria passou a procurar, dentro de suas próprias plantas, a solução para o problema, tentando reaproveitar ao máximo seus próprios efluentes. (MANCUSO & SANTOS, 2003)

O reúso reduz a demanda sobre os mananciais de água devido à substituição da água potável por uma água de qualidade inferior e conserva os meios naturais ao evitar o despejo nos mesmos das águas tratadas. Tal prática é possível em função da qualidade requerida para um uso específico. Ela é ainda mais recomendada no caso de indústrias que devem atender restrições em relação ao uso de água ou à qualidade/quantidade de efluente que pode ser gerado.

O reúso é hoje uma alternativa que não pode ser ignorada, notando-se distinção cada vez menor entre técnicas de tratamento de água *versus* técnicas de tratamento de esgotos (MANCUSO & SANTOS, Reúso de Água, 2003). Com um crescimento anual de mais de 15%, o reúso se tornou uma prática estabelecida. Ainda assim, no mundo, menos de 10% das águas tratadas são reutilizadas (MANCUSO, Reúso de Água para Torres de Resfriamento, 2001).

O presente trabalho discorre sobre a modelagem e a simulação de um processo de tratamento terciário (ou avançado) das águas residuárias de uma refinaria, visando adequação do efluente tratado ao reúso como água de reposição em uma torre de resfriamento. A refinaria em questão é a Refinaria Gabriel Passos, REGAP, da PETROBRAS, localizada em Betim, Minas Gerais.

No processo de tratamento terciário estão operando as seguintes unidades: clarificação de alta taxa, filtração em areia, filtração em carvão ativado granular (CAG) e dessalinização via Eletrodialise Reversa (EDR).

O trabalho se encontra-se organizado como se segue. No Capítulo II é

apresentada uma revisão bibliográfica sobre os principais assuntos pertinentes ao bom entendimento deste documento, a saber: a água e os parâmetros de controle de qualidade; a refinaria e seus efluentes; o reúso e sua aplicação em sistemas de resfriamento; e, por fim, a dessalinização de efluentes.

No Capítulo III, o processo de tratamento de efluentes, já operante na Refinaria estudada, é descrito, com especial enfoque no tratamento terciário. Cada um dos equipamentos do tratamento terciário é analisado separadamente, detalhando-se suas características e capacidades históricas de abrandamento.

O Capítulo IV apresenta a modelagem do processo de tratamento terciário com a modelagem individual de cada um dos equipamentos utilizados. O modelo matemático gerado é empregado, em seguida, para a simulação do comportamento do processo em relação ao efluente tratado e às condições operacionais.

A conclusão, além de sintetizar o que foi desenvolvido, se ata a analisar a pertinência dos resultados encontrados e a relevância e possibilidades de melhorias do modelo proposto.

## **2. Objetivo**

O presente trabalho tem como objetivo modelar e simular as operações de uma unidade de tratamento terciário de efluente de refinaria visando ao reúso em sistema de resfriamento. A modelagem partiu dos dados de monitoramento da água no tratamento terciário atualmente existente e operante. A simulação foi feita a partir de dados de entrada do efluente. A adequação do modelo foi medida através da comparação da simulação com o comportamento real do sistema.

A simulação e a existência de limites para reposição no sistema de resfriamento permite também determinar, através do método das tentativas, as características do efluente que, após passagem pelo tratamento terciário, atenderão os limites dos parâmetros para o uso desejado.

## **3. Motivação**

Este trabalho foi motivado pelo interesse acadêmico de aprofundar o conhecimento dos processos de tratamento terciário de águas para fins de reaproveitamento, dada a problemática hídrica apresentada e o papel desempenhado pela gestão integrada de águas na sua resolução.

Seguiu-se o desejo de simular os processos de tratamento já existentes com o objetivo de, a partir da teoria e do monitoramento analítico existente, desenvolver uma ferramenta prática para previsão de comportamento industrial e de respostas às variabilidades do processo.

## II. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

---

### 1. A Água e seus Parâmetros de Qualidade

A água em seu estado puro é uma substância química composta de átomos de hidrogênio e oxigênio. No entanto, no cotidiano, o termo água pode também ser usado para designar uma mistura com uma variedade de substâncias químicas dissolvidas ou em suspensão.

Segundo FARIA (Reúso das Correntes de Efluentes Aquosos em Refinarias de Petróleo, 2004) a qualidade da água é avaliada em termos de suas propriedades físicas, químicas e microbiológicas.

- **Características Físicas:** Fazem parte destas o gosto, o odor, a cor e a turbidez da água. São parâmetros controlados em redes de abastecimento público e em indústrias de refrigerantes e de processamento de alimentos devido à potabilidade final desejada. Estas características podem ser classificadas como organolépticas por estarem ligadas ao que pode ser percebido pelos sentidos humanos;
  - O gosto e o odor são frutos da presença de compostos orgânicos voláteis e matéria orgânica em decomposição;
  - A cor é causada por minerais como o ferro e o manganês, por material orgânico dissolvido e por efluentes coloridos de indústrias;
  - A turbidez é gerada pelo conjunto de partículas em suspensão e, por isso, é indesejável nos processos industriais de uma maneira geral.
- **Características Químicas:** Os muitos compostos químicos presentes na água podem ser de origem natural ou industrial, podendo ser benéficos ou prejudiciais, dependendo da concentração em que estão presentes. Algumas características químicas importantes estão listadas a seguir.
  - O ferro e o manganês podem oxidar e formar depósitos em tubulações e equipamentos.
  - As águas duras (alto teor de cálcio, magnésio e sulfato) podem formar incrustações em caldeiras e equipamentos.
  - O cloreto e a amônia são corrosivos em altas concentrações.
- **Características Microbiológicas:** Na água estão presentes micro-organismos como bactérias, fungos e algas, além de vírus, que podem ser patogênicos ou não.

As análises para um projeto de água de alimentação para o setor industrial incluem, no mínimo, o detalhamento das seguintes características químicas e físicas (FARIA, 2004 e THURLER, 2012):

- **Sólidos Dissolvidos Totais (SDT):** mede a presença de substâncias orgânicas e inorgânicas dissolvidas, sob forma molecular, iônica ou micro-granular;
- **Sólidos Suspensos Totais (SST):** mede a presença de sólidos em suspensão (material particulado), que originam a turbidez e podem causar assoreamento, mas que são mais facilmente removíveis;
- **Carbono Orgânico Total (COT):** ligada a quantidade de matéria orgânica

- dissolvida ou em suspensão;
- Óleos & Graxas (O&G): indicador que mede a quantidade de uma ampla classe de substâncias sob forma livre ou emulsionada que podem ser extraídas por solventes orgânicos;
  - Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO): quantidade de oxigênio requerida por micro-organismos para oxidar os compostos presentes na amostra;
  - Demanda Química de Oxigênio (DQO): quantidade de oxigênio necessária à oxidação química dos compostos da amostra. O teste é feito com um oxidante químico (dicromato de potássio) em meio ácido (ácido sulfúrico);
  - Ferro e Manganês: ligados à formação de depósitos;
  - Dureza e Alcalinidade: Podem ser calculadas a partir de outros íons, relacionadas à formação de incrustações;
  - Bário e estrôncio: também relacionados à formação de depósitos;
  - Sílica: também ligada à formação de incrustações;
  - $\text{HCO}_3^-$ : ligado à acidez da água;
  - Cloro residual total: O cloro é um agente inibidor da atividade microbiana;
  - pH
  - Turbidez: determinada pelo espalhamento e pela absorção de luz pelo material sólido em suspensão, sendo medida em NTU.
  - Temperatura máxima e mínima de operação

Para que se possa atender um determinado fim com uma dada água, é necessária uma avaliação das características do efluente disponível e dos requisitos de qualidade exigidos para a aplicação desejada.

Uma vez definidas as características de entrada e de saída do sistema, pode-se projetar a sequência de operações unitárias que, interligadas, garantem o tratamento necessário.

## **2. A Refinaria de Petróleo e seus Efluentes**

O termo petróleo – que vem do latim *petroleum*, uma combinação de *petrus* e *oleum*, significando óleo de pedra – é utilizado para designar uma substância oleosa, inflamável com cheiro característico e coloração que pode variar desde o castanho claro até o preto. É naturalmente uma complexa mistura de hidrocarbonetos, que pode apresentar, conforme a origem, composição variável de enxofre, nitrogênio oxigênio e metais.

Para que seja aplicável ou utilizável de forma mais eficaz (o petróleo bruto é utilizável apenas como combustível), esta mistura complexa deve ser processada para que estas frações constituintes sejam separadas.

Ao processamento do petróleo se dá o nome de refino, na medida em que esta carga complexa se particiona gradualmente em frações de composição mais homogênea e, assim sendo, de maior valor agregado.

As refinarias de petróleo são compostas de um complexo sistema de operações de processamento cuja operação varia conforme as características do petróleo a ser refinado e à demanda do mercado.

Em uma refinaria de petróleo a água é um insumo básico utilizado em diversas aplicações: processos de refino do petróleo (dessalgação, solubilização de sais, preparo de produtos químicos); em sistemas de utilidades (geração de vapor e água de resfriamento); serviços de manutenção (limpeza, rega e teste hidrostático de equipamentos) e em sistemas anti-incêndio. (MACHADO, 2008)

Em média, para cada m<sup>3</sup> de óleo processado são utilizados 0,78 a 0,9 m<sup>3</sup> água e são gerados 0,3 m<sup>3</sup> efluente/m<sup>3</sup> óleo processado (MACHADO, 2008). No caso da REGAP, segundo (BARBOSA, 2007), tem-se o uso de 1,06 m<sup>3</sup> água/m<sup>3</sup> óleo processado e a geração de 0,45 m<sup>3</sup> efluente/m<sup>3</sup> óleo processado, demonstrando certo *gap* de ecoeficiência.

As características dos efluentes hídricos gerados dependem da matéria-prima processada, das etapas de transformação e da incorporação de substâncias como solventes, aditivos, etc. Os principais contaminantes encontrados são: óleo livre e emulsionado, fenóis, mercaptanos, sulfetos, amônia e cianetos. (MACHADO, 2008)

Segundo FARIA (Reúso das Correntes de Efluentes Aquosos em Refinarias de Petróleo, 2004) e de acordo com dados do Banco Mundial de 1997, a composição média dos efluentes de uma refinaria antes de entrada na Estação de Tratamento de Efluentes (ETE) é apresentada na Tabela 2.

*Tabela 2. Composição média dos efluentes de uma refinaria*  
*Fonte: (FARIA, 2004)*

Parâmetro	Faixa (mg/L)
Benzeno	1 - 100
Chumbo	0,2 - 10
Cromo	0,1 - 100
DBO	150 - 250
DQO	300 - 600
Fenóis	20 - 200
O&G	100 - 300
Resíduos Sólidos	3-5 kg/ton de petróleo cru processado

A estação de tratamento de efluentes é geralmente dividida em quatro etapas: um tratamento preliminar de remoção de sólidos grosseiros; um tratamento primário de separação física de óleos livres e emulsionados; um tratamento secundário de remoção de material solúvel e de matéria orgânica; e, caso necessário, um tratamento terciário de polimento do efluente para adequação aos padrões de descarte ou reúso interno.

### **3. O Reúso em Sistemas de Resfriamento**

#### **3.1. O Reúso**

No livro *Reúso de Água* de Pedro Mancuso, o autor traça a distinção entre os diferentes tipos de reúso de água. De acordo com a classificação da Organização Mundial de Saúde (1973) são:

- Reúso Indireto: ocorre quando a água já usada, uma ou mais vezes para uso

doméstico ou industrial, é descarregada nas águas superficiais ou subterrâneas e utilizada novamente à jusante, de forma diluída;

- Reúso Direto: é o uso planejado e deliberado de esgotos tratados para certas finalidades como irrigação, uso industrial, recarga de aquífero e água potável;
- Reciclagem Interna<sup>1</sup>: é o reuso da água internamente a instalações industriais, tendo como objetivo a economia de água e o controle da poluição.

Ainda segundo o texto, a Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental (ABES), seção São Paulo, utiliza uma versão expandida da classificação feita por Westerhoff (1984) e que separa o reuso de água em duas grandes categorias: portátil e não portátil:

- Reúso Potável:
  - Direto: Quando o esgoto recuperado, por meio de tratamento avançado, é diretamente reutilizado no sistema de água potável. Deve-se atentar à presença de micropoluentes;
  - Indireto: Caso em que o esgoto, após tratamento, é disposto na coleção de águas superficiais ou subterrâneas para diluição, purificação natural e subsequente captação, tratamento e finalmente utilizado como água potável.
- Reúso Não Potável:
  - Para fins industriais: Abrange os usos industriais de refrigeração, águas de processo, para utilização em caldeiras, etc.;
  - Para fins recreacionais: Classificação reservada à irrigação de plantas ornamentais, campos de esportes, parques e para enchimento de lagoas ornamentais e recreacionais;
  - Para fins domésticos: Reúso para rega de jardins residenciais e para descargas sanitárias;
  - Para manutenção de vazões: Utilização planejada de efluentes tratados visando a uma adequada diluição de eventuais cargas poluidoras a eles carregadas;
  - Aquicultura: Produção de peixes e plantas aquáticas visando à obtenção de alimentos ou energia, utilizando-se os nutrientes presentes nos efluentes tratados;
  - Recarga de aquíferos subterrâneos: Recarga realizada de forma direta por injeção sob pressão, ou de forma indireta, utilizando-se águas superficiais.

No caso estudado, tem-se o reuso de efluente de uma refinaria como água de reposição na torre de resfriamento, visando a redução do consumo de água da planta. Este caso se enquadra, assim, na categoria de Reciclagem Interna não portátil para fins industriais.

### **3.2. A Água de Resfriamento e a Torre de Resfriamento**

---

<sup>1</sup> A distinção entre Reúso Direto e Reciclagem Interna é pouco clara, mas considera-se que não há tratamento na Reciclagem Interna.

Nas refinarias, a troca térmica entre uma corrente quente, advinda de um processo de destilação, por exemplo, e de uma corrente fria (no caso, a água), ocorre em trocadores de calor.

Visando a minimização do consumo de água utilizada neste processo, esta, que sai aquecida do trocador, é encaminhada a uma Torre de Resfriamento para, então, ser recirculada. O sistema de resfriamento pode consumir até 90% da água utilizada em uma refinaria. No caso da REGAP este valor é de aproximadamente 50% (MACHADO, 2008).

Na Torre de Resfriamento, a água quente é aspergida no topo e troca calor com o ar que é injetado em contra corrente. A água fria coletada na base da torre é encaminhada para o trocador de calor. Na Figura 2, encontram-se discriminadas as vazões de água observadas no caso específico da Torre de Resfriamento do Coque para onde são direcionadas as águas de reúso da REGAP (há outras Torres de Resfriamento em operação na refinaria).

Observa-se que, nesta Torre, há uma perda de, em média, 48 m<sup>3</sup>/h (1,30%) da água recirculante (3700 m<sup>3</sup>/h) por evaporação para um abaixamento de 9°C na temperatura da mesma. Há ainda uma quantidade (12 m<sup>3</sup>/h) de água resfriada que é purgada para limitar a concentração salina. Assim, faz-se necessária a adição de uma parcela de água de reposição e o sistema é considerado semiaberto.

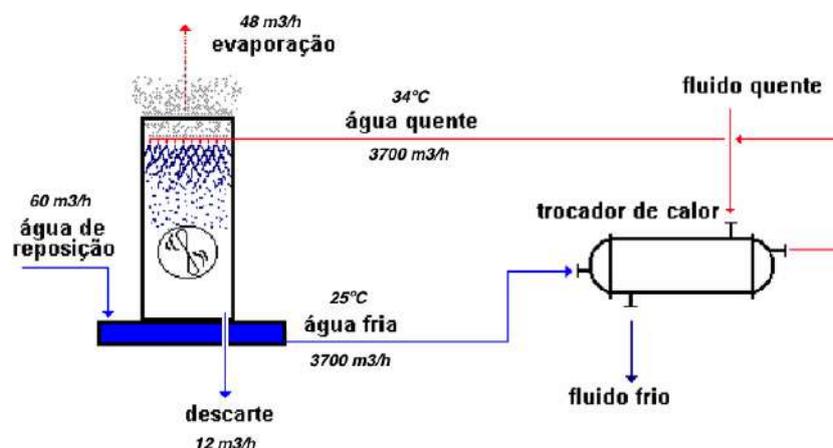


Figura 2. Circuito Semiaberto de recirculação de água da REGAP

Fonte: Adaptado de (MANCUSO, 2001)

Segundo MANCUSO (2001), em circuitos semiabertos os problemas que podem ocorrer na superfície do trocador de calor em consequência da qualidade da água em recirculação são:

- Depósitos: formados quando há deficiência no processo de clarificação ou filtração da água; quando ocorre a absorção de poeira do meio ambiente; ou quando o teor de óxido de ferro, sílica ou outros metais dissolvidos está alto;
- Corrosão: proveniente da alta salinidade (sulfatos e cloretos) da água;
- Incrustações: ocorrem devido à presença de dureza temporária e/ou de sílica combinada a sais de magnésio;
- Fouling: fenômeno que ocorre da junção da biomassa ligante (algas, fungos e bactérias formadoras de limo aderente às superfícies metálicas) com

sólidos dissolvidos constituindo o material aglutinado.

- Borrás: Comuns quando no tratamento da água se utilizam inibidores de corrosão e agentes anti-incrustantes.

Geralmente, a água de reposição apresenta baixos níveis de micro-organismos, dadas as diferentes etapas de pré-tratamento. Porém, um dos maiores problemas apontados nas torres de resfriamento está relacionado ao crescimento microbiano quando há nutrientes (nitrogênio amoniacal e matéria orgânica) dissolvidos na água. Neste caso, pode haver a formação de um filme de micro-organismos na superfície do trocador de calor, diminuindo a eficiência do mesmo, ou mesmo na torre de resfriamento, diminuindo o resfriamento efetivo. (US-EPA, 1992)

Em relação à formação de crostas, há maior incidência quando a água apresenta concentração excessiva de cálcio, magnésio, sulfato, fosfato ou sílica e/ou uma alcalinidade considerável. (US-EPA, 1992)

Pode-se realizar um balanço de massa no sistema de resfriamento a fim de se obter o ciclo de concentração da torre, ou seja, o quanto concentrada a água de recirculação fica em relação à água de reposição.

Definindo:

A: água de reposição (make up) – no caso da REGAP igual a 60 m<sup>3</sup>/h

C<sub>A</sub>: Concentração iônica na alimentação, para um sal qualquer

E: água perdida por evaporação no sistema – igual a 48 m<sup>3</sup>/h

C<sub>E</sub>: Concentração iônica na evaporação

P: água de purga – igual a 12 m<sup>3</sup>/h

C<sub>P</sub>: Concentração iônica na purga

C: ciclo de concentração de sal no sistema,  $C = C_A/C_P$

O Balanço Iônico Global fornece:  $A.C_A = E.C_E + P.C_P$

Porém, na evaporação,  $C_E = 0$  mg/L e :  $A.C_A = P.C_P \therefore C = C_A/C_P = A/P$

No caso da REGAP,  $C = 60/12 = 5$ . Ou seja, a concentração de um sal na alimentação aumenta 5 vezes no sistema existente da REGAP antes de sua purga.

No caso da Torre de Resfriamento da refinaria estudada, o problema de maior relevância é a possibilidade de corrosão dada a alta salinidade do efluente. De fato, o efluente pós-tratamento secundário tem condutividade da ordem de 1500 μS/cm, quando o ideal seria de 300 μS/cm na água de reposição.

A corrosão se dá quando a película anticorrosiva aplicada nas superfícies metálicas se danifica, seja por ação mecânica ou pela própria ação de íons como o cloreto. Nesse caso, é formada uma área ativa (anódica) na presença de uma grande área passiva (catódica), gerando uma forte pilha, que corrói localmente o material.

Decorre disto a necessidade de uma etapa de dessalinização da água para sua adequação ao reúso. É importante, também, que sejam evitadas a formação de incrustações devido à dureza e à alcalinidade do efluente e à ocorrência de depósitos de óxido ferro.

A Tabela 3 discrimina os menores limites de concentrações e de valores de certos parâmetros dentre os recomendados pela Environmental Protection Agency – US-EPA (1992) e por (TROVATI, 2004) para adequação ao uso como água de reposição em sistemas de resfriamento com circuitos semiabertos. Considerando o ciclo de concentração do sistema estudado, os limites reajustados a serem respeitados devem ser cinco vezes menores do que os recomendados. São estes os valores que determinam a adequação do efluente pós-tratamento terciário ao reúso como água de reposição.

*Tabela 3. Recomendações para Água de Reposição de Sistemas de Resfriamento*  
*Fonte: (US-EPA, 1992) e (TROVATI, 2004)*

Parâmetro	Limite Recomendado (mg/L)	Limite Ajustado (mg/L)
Alcalinidade	350	70
Alumínio (Al)	0,1	0,02
Amônia (NH <sub>4</sub> N)	1,0	0,20
Cálcio (Ca)	50	10
Cloretos (Cl)	500	100
Condutividade	3000 (µS/cm)	600 (µS/cm)
DBO	25	5
DQO	75	15
Dureza	400	80
Ferro (Fe)	0,5	0,1
Fosfato (PO <sub>4</sub> )	4,0	0,8
Magnésio (Mg)	0,5	0,1
Manganês (Mn)	0,5	0,1
pH	6,9 – 8,5 (adim)	6,9 – 8,5 (adim)
Sílica (SiO <sub>2</sub> )	50	10
SDT	500	100
SST	100	20
Sulfato (SO <sub>4</sub> )	200	40
Turbidez	20 (NTU)	4 (NTU)

É importante observar que, para a utilização da água na forma de vapor, o grau de qualidade deve ser bastante elevado, enquanto a utilização como fluido de resfriamento requer um grau de qualidade menos restritivo (MACHADO, 2008).

## **4. A Dessalinização e a Eletrodialise Reversa**

### **4.1. A Dessalinização de águas**

A dessalinização de águas é empregada desde a Antiguidade para tornar potável a água do mar ou a água salubre de rios, se tornando especialmente importante na época das grandes viagens marítimas do século XVI. (MACHADO, 2008)

Originalmente, o processo empregado para a dessalinização era a destilação, o que o tornava energeticamente dispendioso e inviável para ser aplicado em projetos de tratamento de grandes volumes de água.

O crescente interesse em diminuir o consumo de água em indústrias levou a busca por novas técnicas. Surgiram, então, na década de 50, processos envolvendo membranas. Na década de 70, este método ganhou proporções comerciais, através da Eletrodialise Reversa (EDR) e da Osmose Inversa (OI).

#### 4.2. Comparativo entre Eletrodialise Reversa e Osmose Inversa

Segundo Machado (Avaliação do Processo de Eletrodialise Reversa no Tratamento de Efluentes de Refinaria de Petróleo, 2008), distinguem-se alguns fatores que devem ser analisados para avaliar a melhor adequação de cada um desses métodos de dessalinização:

1. O pré-tratamento e o consumo de produtos químicos exigidos;
2. A vida útil das membranas constituintes;
3. O consumo de energia associado.

Em relação ao primeiro item, os sais com baixa solubilidade, como sais de cálcio, afetam ambas as tecnologias, assim como contaminantes orgânicos que devem ser removidos previamente. No entanto, a EDR se mostra mais tolerante ao ferro, manganês, alumínio e ao cloro. Não é imperativo nesse processo, ao contrário do tratamento via OI, o uso de anti-incrustantes e biocidas. A Tabela 4 coloca em evidência o caráter menos restritivo da EDR em relação à OI.

Tabela 4. Comparativo de Limites Paramétricos EDR x OI  
Fonte: (MACHADO, 2008)

Parâmetro	Limite para EDR (ppm)	Limite para OI (ppm)
Alumínio	0,1	0,01
Cloro livre	0,5 / Pico de 15-20	Ausente / Pico de 0,1
COT	15	3
DQO	50	-
Ferro	0,3	0,05
Manganês	0,1	0,05
O&G	2	Ausente
Sílica	Ilimitado até saturação	Depende de recuperação
Turbidez	0,5 NTU / Pico de 2 NTU	Ausente / Pico de 1 NTU

A membrana utilizada na EDR pode ter tempo de vida mais longo do que a utilizada na Osmose Inversa. Isto se dá em parte porque neste último processo ocorrem problemas de *fouling* biológico. Como a membrana da OI é seletiva também em relação a bactérias, aglomerados microbianos se formam e diminuem a capacidade de dessalinização.

Por fim, o consumo energético, medido em kWh/m<sup>3</sup>, é menor no processo de dessalinização via EDR se comparado à OI, no caso de águas apresentando um teor de Sólidos Dissolvidos Totais menor do que 2000 ppm. (MACHADO, 2008)

A Eletrodialise Reversa apresenta como relativa desvantagem o fato de remover apenas íons. Assim, compostos fracamente carregados como a sílica, compostos orgânicos, micro-organismos e compostos que conferem odor e sabor à água não são removidos. (MACHADO, 2008)

No caso de reúso de águas para fins de reposição em sistemas de resfriamento é importante que a água passe pelo pré-tratamento mais simples possível e que apresente menor custo operacional. A característica da água de saída não precisa atender exigências organolépticas quanto ao cheiro e cor. Neste caso, a EDR é a aplicação mais adequada, desde que sejam respeitados teores reduzidos de COT e micro-organismos para não gerar problemas de *biofouling* nas membranas.

### 4.3. A Eletrodialise Reversa e suas Características

A Eletrodialise Reversa é um processo que utiliza um diferencial de potencial elétrico como força motriz para remover sais e outras espécies ionizadas de uma solução menos concentrada para uma mais concentrada através de sua passagem por membranas aniônicas e catiônicas empilhadas alternadamente.

Quando aplicado um potencial elétrico nos eletrodos, os ânions dissolvidos se deslocam para o Cátodo e os cátions para o Ânodo. As membranas são seletivas quanto à transferência de íons, ou seja, as moléculas de água ou outras moléculas neutras não conseguem atravessá-las (GE Company, 2007). Os cátions atravessam as membranas catiônicas, sob influência do potencial elétrico, mas são bloqueados pelas membranas aniônicas. O inverso acontece com os ânions: são transferidos através das membranas aniônicas, por influência da polaridade, mas não passam pelas membranas catiônicas (Figura 3).

A água é adicionada em dois fluxos distintos que não se encontram: um primeiro, com a água que irá ser tratada e sairá desmineralizada e um segundo, com a água que se torna mais concentrada no processo. Uma grande quantidade de membranas produzidas na forma de folha são empilhadas para que seja atingida a vazão necessária (Figura 4).

O termo “reversa” se refere à reversão periódica da polaridade aplicada (3 a 4 vezes a cada hora). Isto possibilita que a superfície da membrana realizando a retenção seja alternada. Eventuais aglomerados que tenham se formado podem assim ser soltos e removidos pelo fluxo em contracorrente, prolongando a vida útil da membrana. Se, devido a isso, a salinidade da solução diluída for maior do que o nível especificado, esta água pode ser descartada durante 1 a 2 minutos. (MACHADO, 2008) É importante notar que a reversão da polaridade permite produção contínua de água desmineralizada e controle de concentração nos canais.

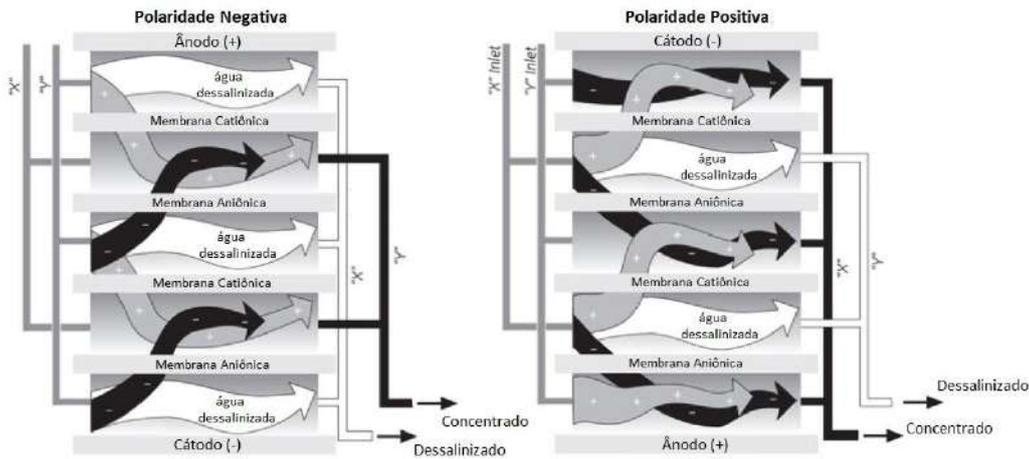


Figura 3. Esquema de fluxo de íons na Eletrodialise com reversão de polaridade  
 Fonte: (GE Company, 2007)

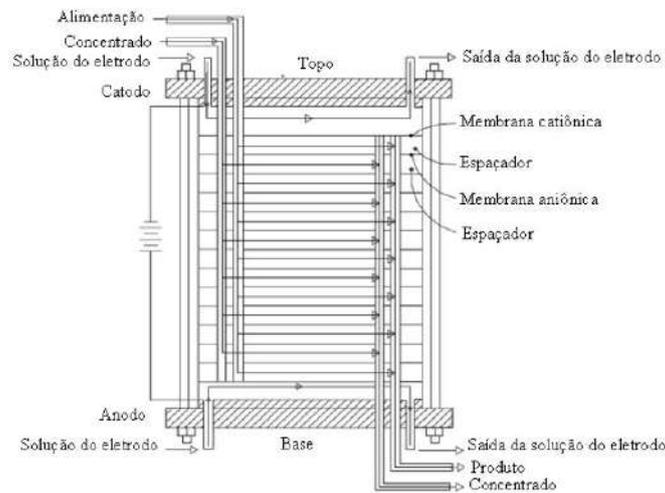


Figura 4. Esquema detalhado de Unidade de Eletrodialise Reversa  
 Fonte: (MACHADO, 2008)

A EDR é capaz de remover espécies ionizadas com tamanho entre 0,0004 e 0,1  $\mu\text{m}$ , enquanto, que não são removidos espécies neutras ou espécies iônicas de grande massa molecular maiores que os poros da membrana.

A maioria das membranas empregadas são resinas de troca iônica sintéticas formadas por uma estrutura orgânica organizada com grupos funcionais a ela atrelados. No caso das membranas catiônicas, os grupamentos mais comuns são o sulfônico ( $\text{R-SO}_3^-$ ) e o carboxílico ( $\text{R-COO}^-$ ), enquanto que para as aniônicas são grupamentos amônio ( $\text{R-N(CH}_3)_3^+$  e  $\text{R-N(CH}_3)_2\text{H}^+$ ) (Figura 5).

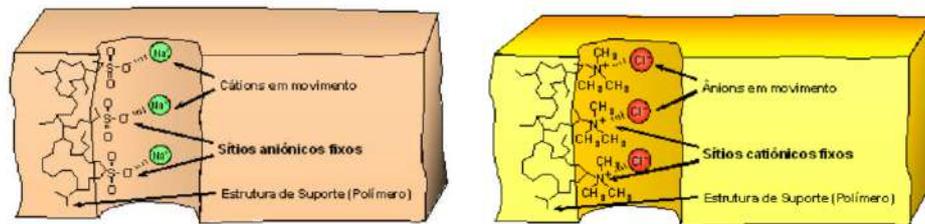


Figura 5. Esquema representativo de Membranas Catiônicas e Aniônicas  
Fonte: (MACHADO, 2008)

Usualmente, a matriz polimérica é formada por um copolímero de estireno com divinil benzeno ou por uma matriz acrílica. O grupo funcional é usualmente inserido pela reação da matriz polimérica com um composto contendo o grupamento desejado. A capacidade de troca é determinada pelo número de grupos funcionais por unidade de massa da resina. (ECKENFELDER, 2000)

Em uma membrana de troca catiônica, os grupos negativos fixados estão em equilíbrio elétrico com os cátions em movimento. Por outro lado, os ânions em movimento são excluídos da matriz polimérica por apresentarem carga idêntica a dos grupos fixos. Desse modo, somente a transferência de cátions é possível na membrana catiônica. O inverso ocorre na membrana aniônica.

Em geral, a vida útil das membranas empregadas na EDR pode durar até 10 anos, podendo durar mais, se houver operação e manutenção adequada da unidade. Geralmente, as membranas catiônicas duram mais do que as aniônicas. Isto se dá pela maior suscetibilidade destas últimas ao fenômeno de *fouling* por orgânicos. Para prevenir este problema, são utilizadas no caso das membranas aniônicas, membranas de base acrílica que são naturalmente menos suscetíveis.

Segundo Machado (Avaliação do Processo de Eletrodialise Reversa no Tratamento de Efluentes de Refinaria de Petróleo, 2008), a energia consumida na transferência de íons é de 0,54 kWh/kg de sal removido/m<sup>3</sup> produto. Porém, ainda que o potencial aplicado seja o maior fator de consumo elétrico nestas unidades, há certa parte (1 a 3% do total) de energia associada às reações de oxirredução que ocorrem no cátodo e no ânodo e outra parte (20%) ligada ao bombeamento da solução. Por via de regra utiliza-se como equação de energia consumida, levando-se em conta bombeamento e dessalinização, a seguinte:

$$\text{Energia total} = 0,7 \text{ kWh/m}^3 \text{ de produto} + 0,7 \text{ kWh/kg sal removido/m}^3 \text{ produto}$$

Além do emprego na dessalinização de águas, a EDR tem sido utilizada na recuperação de metais obtidos por via eletrolítica; na concentração do efluente da osmose inversa para minimização de descarga; na purificação de fluidos alcalinos esgotados; na indústria alimentícia para dessalinização e desacidificação; e na recuperação de ácido fosfórico (ZINKUS & BYERS, 1998).

---

Apresentados os aspectos relevantes ao bom entendimento do restante do projeto, pode-se seguir para a segunda parte do documento, relativa ao estudo dos processos de tratamento de efluentes primário, secundário e, mais detalhadamente,

do terciário existente de uma dada refinaria.

### III. O PROCESSO DE TRATAMENTO TERCIÁRIO DA REGAP

#### 1. A REGAP e o Processo de Tratamento de Efluentes existente

A pedra fundamental das obras da Refinaria Gabriel Passos (Figura 6) foi lançada em 6 de fevereiro de 1963, em Betim, Minas Gerais, e a inauguração se deu 5 anos mais tarde, em 30 de março de 1968. (PETROBRAS, 2013)

A REGAP entrou em operação no ano seguinte com uma capacidade inicial de 45.000 barris/dia, atendendo a demanda de derivados de petróleo do mercado mineiro, antes dependente do transporte rodoviário. (PETROBRAS, 2009)



*Figura 6. Vista aérea do parque petroquímico da REGAP*  
*Fonte: PETROBRAS.com.br*

Atualmente, a refinaria processa 150.000 barris/dia de petróleo Cabiúnas e Marlim originários em 95% da Bacia de Campos. O processamento se dá em duas unidades de Destilação Atmosférica e a Vácuo, duas de Craqueamento Catalítico, uma de Coqueamento Retardado e quatro de Hidrotratamento (Figura 7). Segundo dados de 2009, a produção da REGAP corresponde a cerca de 8% da produção total da PETROBRAS.



*Figura 7. Unidades de Destilação, Craqueamento, Coqueamento e Hidrotratamento*  
*Fonte: PETROBRAS.com.br*

Os efluentes hídricos do processo de refinamento, após a remoção preliminar de sólidos grosseiros, são encaminhados para um sistema de tratamento primário, de separação de óleos; e de tratamento secundário, de remoção de matéria orgânica e de nitrogênio na forma amoniacal.

O tratamento preliminar dos efluentes coletados consiste em uma etapa de gradeamento para retenção de folhas, plásticos etc.; de uma etapa de desarenação, realizada em uma grande caixa hídrica, onde ocorre a deposição de areia e sólidos sedimentáveis; e de um tanque pulmão, que tem como função amortecer possíveis choques na qualidade e quantidade do efluente. O tratamento preliminar funciona assim como proteção aos tratamentos subsequentes.

O tratamento primário (Figura 8) é composto de dois tanques de separação água/óleo em paralelo, para remoção de óleos livres; e de uma unidade de flotação tipo ar dissolvido, para remoção de óleos emulsionados (PETROBRAS, 2009).



*Figura 8. Tratamento Primário de Efluentes Hídricos: Separação água/óleo e Flotação*  
*Fonte: PETROBRAS*

O tratamento secundário (Figura 9) é formado inicialmente por duas bacias de aeriação operando em série, a primeira sendo de mistura completa, a segunda de aeriação facultativa. Em seguida, o tratamento continua nos biodiscos. Esta fase do tratamento é também chamada de biológico, pois há degradação de matéria orgânica e remoção de nitrogênio como consequência do metabolismo de micro-organismos que se encontram no lodo das lagoas aeradas e no biofilme formado dentro dos biodiscos (PETROBRAS, 2009).



*Figura 9. Tratamento Secundário: Bacias de Aeriação e Biodiscos (detalhe do Biofilme)*  
*Fonte: PETROBRAS*

As águas efluentes da refinaria, após estes tratamentos, seguem para uma lagoa de deposição de sólidos (ou lagoa de polimento) sendo então descartada no corpo natural, mais precisamente no Córrego dos Pintados, que desagua na Lagoa de Ibitité, localizada nas cercanias (PETROBRAS, 2009).

## 2. Processo de Tratamento Terciário de Efluentes da REGAP

A ideia de implantar o reúso de parte das águas efluentes como água de make-up da torre de resfriamento surgiu em 2001, no intuito de se alinhar às diretrizes corporativas relacionadas ao meio ambiente. O projeto prevê o desvio para reúso de 90 m<sup>3</sup>/h dos 350 m<sup>3</sup>/h totais efluentes dos biodiscos (PETROBRAS, 2006). Este efluente passa por um sistema de tratamento complementar a fim de se adequar ao uso pretendido.

Sistema de tratamento, do ponto de vista de solução tecnológica adotada, é uma sequência de operações e processos unitários definidos em razão de três requisitos (MANCUSO & SANTOS, 2003):

1. Das características do líquido a ser tratado;
2. Dos objetivos pretendidos com o tratamento;
3. Da capacidade de remoção de cada processo unitário.

O tratamento terciário, ou avançado, das águas de descarte da refinaria para reúso como água de reposição é composto das seguintes operações, cujas vazões estão descritas na Figura 10:

- Clarificação avançada: remoção de sólidos em suspensão totais (SST) e da Turbidez no efluente tratado para adequação à adsorção em carvão ativado e para proteção do sistema de membranas;
- Filtração em Areia: retenção complementar de SST e da Turbidez para entrada no filtro de carvão (2 filtros em paralelo);
- Adsorção em Filtro de Carvão: remoção de compostos orgânicos dissolvidos (Carbono Orgânico Total - COT) para adequação à EDR;
- Eletrodíálise Reversa (EDR): remoção de sais dissolvidos para possibilitar uso no sistema de refrigeração da torre de resfriamento.

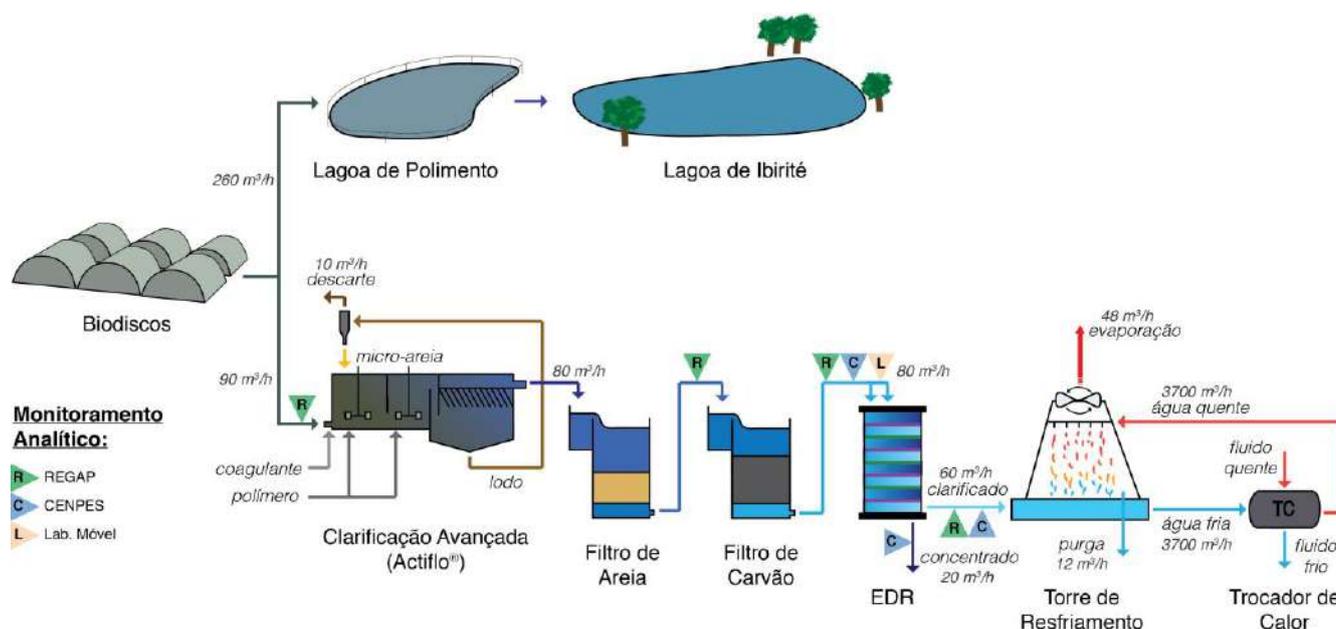


Figura 10. Fluxograma do Processo de Tratamento Terciário para Reúso da REGAP

Fonte: Elaboração própria

A seguir, são apresentadas as etapas de tratamento e suas condições de operação, bem como tabelas detalhando a efetiva remoção de parâmetros.

O monitoramento analítico foi realizado pelo laboratório da REGAP e pelo CENPES, ao longo dos anos de 2010, 2011 e 2012, retratando o perfil mais atual da qualidade do efluente. Algumas considerações devem ser feitas em relação ao monitoramento analítico estudado.

Em relação ao monitoramento realizado pelo CENPES, o objetivo principal foi determinar o desempenho da EDR. Só foram medidos os parâmetros na saída do filtro de carvão, na saída do clarificado da EDR e na do concentrado da EDR.

Em relação ao monitoramento realizado pela REGAP, os parâmetros foram medidos ao longo do processo, mas não necessariamente em todos os pontos do mesmo. Por exemplo, o teor de Óleos e Graxas foi quantificado na saída dos biodiscos, na saída da Clarificação + Filtro de Areia e na saída da EDR, mas não houve para algumas substâncias quantificação na saída do filtro de carvão.

No fluxograma apresentado na Figura 10 estão assinalados os pontos de análise dos respectivos laboratórios. No caso de parâmetros que foram analisados somente por um laboratório, o valor médio, a contagem, o desvio padrão, o máximo e o mínimo apresentados são os valores reais encontrados por este.

No caso de parâmetros analisados pelos dois laboratórios, o valor médio foi calculado como a média dos valores obtido por cada um dos laboratórios ponderado pela quantidade de análises que cada um dos laboratórios realizou. A contagem é a soma de testes realizados pelos dois laboratórios. O desvio padrão é obtido também como uma média ponderada dos desvios padrão de cada laboratório. O valor máximo e o mínimo são relativos às análises dos dois laboratórios.

## **2.1. Clarificação Avançada e Filtração em Areia:**

A primeira etapa do tratamento terciário é a clarificação avançada, realizada em um equipamento da Veolia denominado Actiflo® e que visa remoção de turbidez e de sólidos suspensos totais.

O Actiflo® é dividido em 4 câmaras: a de mistura rápida; a de injeção; a de mistura lenta e a de sedimentação.

A água bruta recebe uma injeção de coagulante e de um primeiro polímero antes de sua entrada no clarificador (fase 1 na Figura 11 abaixo). Neste canal de entrada, de volume igual a 4,5 m<sup>3</sup>, o coagulante empregado é o Policloreto de Alumínio (PAC, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) a uma concentração de 7 a 12 mg/L e o polímero utilizado é o Bulab da Buckman, a uma concentração de 5 mg/L (vazão da bomba 7,2 L/h).

A formação de micro-flocos ocorre ainda na fase 1, numa câmara de mistura rápida (2,4 m<sup>3</sup>) que vem em seguida, onde ocorre o processo de coagulação, com auxílio de um agitador mecânico operando a 140-150 rpm. Tal câmara não é mostrada na figura abaixo. (CENPES, 2009)

Na fase 2 – o tanque de injeção, de volume 2,4 m<sup>3</sup> – estes micro-flocos precipitam sob a ação da micro-areia. A micro-areia, de granulometria da ordem de

30-100 microns, é injetada continuamente no processo após ser separada do lodo no hidrociclone. (CENPES, 2009)

No tanque de maturação, a fase 3, os micro-flocos maturam em coágulos, com o auxílio da adição de um segundo polímero, o Kurifloc da Kurita, empregado a concentrações de 0,3 mg/L (vazão da bomba 39 L/h). A câmara de floculação, como também é chamada a câmara de mistura lenta tem 8,6 m<sup>3</sup> e a agitação se dá por meio de um agitador com frequência de 40-70 rpm (CENPES, 2009).

Em seguida, na fase 4, o fluxo avança para uma câmara de decantação lamelar, composta de 2 ramais operando em paralelo com volume de 4,5 m<sup>3</sup> e apresentando basicamente 3 regiões distintas: uma zona de sedimentação de lodo, os módulos lamelares e os vertedores de coleta da água clarificada (CENPES, 2009).

A etapa 5 desta unidade é a de recirculação da lama formada, que uma vez bombeada no hidrociclone é separada da micro-areia. Esta retorna para o processo para diminuir perdas, enquanto a lama é encaminhada continuamente para um tratamento pré-descarte (Veolia Water Solutions, 2013).

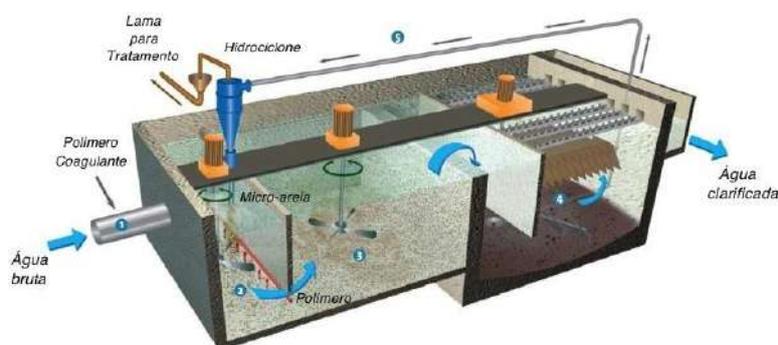


Figura 11. Esquema Clarificação Avançada Actiflo®

Fonte: <http://www.veoliawaterst.com/actiflo>

A etapa de filtração em areia é considerada um complemento da etapa de clarificação avançada na remoção de turbidez e sólidos suspensos totais. É realizada em dois filtros de areia em paralelo funcionando a gravidade convencional – enquanto um filtra o outro pode ser lavado em contracorrente, permitindo operação contínua.

Dos 90 m<sup>3</sup>/h que são tratados na clarificação avançada, há cerca de 10 m<sup>3</sup>/h que são perdidos na forma de lodo. Na Tabela 5 encontram-se os valores de entrada e de saída dos parâmetros analisados para esta etapa e para a etapa seguinte.

*Tabela 5. Remoção paramétrica pós-Clarificação & Filtro de Areia*

*Fonte: elaboração própria a partir de dados fornecidos pela PETROBRAS*

Parâmetro	Unid.	Saída Biodiscos					Saída Clarificação + Filtro de Areia					Remoção
		Média	Cont.	Var.	Máx.	Mín.	Média	Cont.	Var.	Máx.	Mín.	$\Delta\%$
Condutividade	$\mu\text{S/cm}$	1465	549	388	7500	860	1688	119	253	2660	1217	-15%*1
COT	mg/L	21,08	437	10,82	115,3	7,65	16,75	62	16,75	21,88	8,61	21%
DBO	mg O <sub>2</sub> /L	63,57	86	21,11	125	21	21,47	36	21,47	58	2	66%
DQO	mg O <sub>2</sub> /L	89,09	177	39,72	358	32	41,34	104	41,34	121	16	54%
Dureza	mg/L	171,82	355	29,99	266,7	100,5	159,22	16	35,58	211,8	66	7%
Ferro	mg/L	0,83	64	0,40	1,8	0,01	0,03	32	0,03	0,09	0,01	96%
O&G	mg/L	4,38	165	4,05	49	3	3,18	106	3,18	6	0	27%
pH	adim.	7,32	553	0,23	8	5,3	7,07	266	0,41	8,1	4,7	3%
SDT	mg/L	565,17	221	283,20	1720	32	464,23	159	464,23	1400	7	18%
Sílica	mg/L	10,44	40	4,70	19,26	0,68	9,96	33	5,04	22,3**2	2,56	5%
SST	mg/L	23,51	213	25,10	280	3	9,07	138	9,07	47	2	61%
Turbidez	NTU	14,28	322	4,85	34,7	0,11	0,33	252	0,33	1,6	0,02	98%

Onde:

Média = média aritmética histórica do parâmetro mensurado

Cont. = contagem de análises realizadas no período

Var. = desvio padrão dos valores históricos

Máx. = máximo valor encontrado em análise

Mín. = mínimo valor encontrado em análise

Nota-se que:

\*1: Houve aumento da condutividade, possivelmente causada pela adição do coagulante (PoliCloreto de Alumínio).

\*2: A concentração máxima de sílica é maior na saída desta etapa do que na entrada porque as análises de laboratório não foram feitas no mesmo dia.

## 2.2. Adsorção em filtro de Carvão Ativado (CAG)

Esta operação é similar à anterior, com a diferença que, no lugar da areia, é utilizado carvão ativado granular (CAG). Ela visa adsorver moléculas orgânicas em seus microporos, diminuindo a carga de Carbono Orgânico Total (COT).

As moléculas orgânicas, também chamadas de compostos refratários, são passíveis de adsorção até a saturação do microporo do carvão granular, sendo necessária, então, a sua regeneração ou reativação, por meio de aquecimento em altos fornos que volatilizam o material orgânico adsorvido.

Na REGAP, a etapa é composta de três filtros (Figura 12) projetados para operar em sistema carrossel, em que dois filtros operam em série enquanto o terceiro aguarda a saturação do primeiro leito para entrar em operação. Nessa ocasião, o segundo filtro, que atuava como leito de polimento, passa a ser o

principal, e o terceiro filtro, com o carvão virgem, passa a ser o leito de polimento, enquanto se faz a troca do carvão no primeiro filtro (TOUMA, 2013).

Cada filtro adsorvedor de carvão tem 2,8 m de diâmetro e 1,5 m de altura de leito. Assim, a área da seção transversal do filtro é de 6,2 m<sup>2</sup> e o volume total do leito é de 9,3 m<sup>3</sup> (CENPES, 2009).



Figura 12. Microporo de um carvão ativado e Filtros de Carvão em série na REGAP  
Fonte: (TOUMA, 2013)

O carvão ativado granular utilizado nos adsorvedores é o carvão betuminoso produzido por ativação com vapor, de granulometria 12 x 40 “mesh”, da Norit. São utilizados em cada leito 4,4 toneladas de CAG (TOUMA, 2013).

A Tabela 6 apresenta os valores de entrada e de saída dos parâmetros analisados para esta etapa e relevantes para a seguinte.

Tabela 6. Remoção paramétrica pós-Filtro de Carvão  
Fonte: elaboração própria a partir de dados fornecidos pela PETROBRAS

Parâmetro	Unid.	Saída Actiflo + Filtro de Areia					Saída Filtro de Carvão					Remoção Δ%
		Média	Cont.	Var.	Máx.	Mín.	Média	Cont.	Var.	Máx.	Mín.	
Alumínio* <sup>1</sup>	mg/L	-	-	-	-	-	0,04	41	0,05	0,2	0,01	-
Cloro* <sup>2</sup>	mg/L	-	-	-	-	-	0,16	237	0,09	3,16	0	-
Condutividade	μS/cm	1688	119	253	2660	1217	1654	174	24	2160	1106	2%
COT	mg/L	16,75	62	2,60	21,88	8,61	15,62	210	2,92	26,5	8,19	7%
DBO	mg O <sub>2</sub> /L	21,47	36	21,86	58,00	2,00	22,51	39	26,37	105,00	1,00	-5%
DQO	mg O <sub>2</sub> /L	41,34	104	21,11	121	16	43,57	160	29,92	187	5	* <sup>3</sup>
Dureza	mg/L	159,22	16	35,58	211,80	66,00	172,20	127	30,99	277,00	7,40	-8%
Ferro	mg/L	0,03	32	0,02	0,09	0,01	0,04	72	0,03	0,18	0,01	-36%* <sup>4</sup>
Manganês* <sup>5</sup>	mg/L	-	-	-	-	-	0,07	41	0,05	0,24	0,01	-
O&G	mg/L	3,18	106	0,58	6	0	1,76	10	1,25	4,3	0,23	45%
pH	adim.	7,07	266	0,41	8,1	4,7	7,30	28	0,42	8,63	6,51	-3%
SDT	mg/L	464,23	159	218,52	1400	7	757,36	47	98,31	918	535	* <sup>6</sup>
Sílica	mg/L	9,96	33	5,04	22,30	2,56	9,50	32	4,76	22,40	2,14	5%
Turbidez	NTU	0,33	252	0,32	1,6	0,02	0,29	195	0,27	1,96	0,02	11%

Em relação a esta etapa e a próxima, há parâmetros analisados pelo laboratório da REGAP, outros analisados pelo laboratório do CENPES e alguns

analisados pelos dois em paralelo. Este fato acarreta as seguintes ressalvas importantes em relação a alguns dados:

\*1, \*2 e \*5: Estes parâmetros foram monitorados apenas na saída do filtro de carvão e são apresentados aqui porque devem constar em valor abaixo do limite suportado pela EDR e detalhado a seguir (análise do Alumínio e do Manganês realizada pelo CENPES, análise do Cloro realizada pelo laboratório móvel do CENPES).

\*3: Percebe-se um aparente aumento da Demanda Química de Oxigênio. Este dado, porém merece especial atenção: a REGAP realizou as medidas na saída do Actiflo + Filtro de Areia e a média encontrada foi de 41,36 mg/L. O mesmo laboratório realizou 111 testes sobre este parâmetro na saída do Filtro de Carvão e a média obtida foi de 27,26 mg/L (queda de 34%). Porém o CENPES também realizou 49 testes em paralelo na saída do Filtro de Carvão e a média encontrada foi de 80,51 mg/L (o CENPES não mensurou o parâmetro na saída do Actiflo + Filtro de Areia). A média obtida foi de 43,57 mg/L na saída do filtro de carvão, daí um ligeiro aumento da concentração. Como a quantidade de análises realizadas pelos dois laboratórios foi relevante, os resultados de ambas foram levados em conta.

\*6: Um problema similar ocorre em relação à quantidade de sólidos dissolvidos totais (SDT). Este parâmetro foi medido na saída do Actiflo + Filtro de Areia pela REGAP e na saída do Filtro de Carvão pelo CENPES. Na quantificação, os dois laboratórios encontraram quantidades que não convergem absolutamente. Porém, assim como no caso anterior, ambas as análises foram consideradas.

Além disso, pode-se fazer outra observação quanto ao ferro:

\*4: Percebe-se um leve aumento da quantidade de Ferro, provavelmente devido à alta concentração de uma amostra coletada somente no ponto a jusante do filtro de carvão, sem que fosse levantada a correspondente concentração para o ponto a montante do filtro.

Esta etapa não demonstra uma grande eficácia de remoção em relação ao parâmetro de interesse: o Carbono Orgânico Total (COT), para adequação à EDR. Este problema ocorreu em decorrência da saturação do carvão ativado em um curto período de tempo de operação. Segundo a literatura (ECKENFELDER, 2000), o CAG recém-ativado remove em torno de 92% do COT presente em efluentes de refinaria de petróleo, mas a remoção cai para pouco mais de 10% após 20 dias de operação.

Apesar das ressalvas feitas e da ineficácia relativa da etapa, todos os parâmetros estudados se encontram dentro dos limites a serem atendidos pela EDR, conforme pode ser observado na tabela abaixo. A carga em Carbono Orgânico Total apresenta valor próximo do limite, porém, como foi explicado a EDR pode efetuar a remoção de certa quantidade de moléculas orgânicas ionizáveis, não representando um perigo maior à operação. Ainda assim, uma operação otimizada desta etapa é a se buscar, a fim de se evitar eventuais problemas de *fouling*.

*Tabela 7. Adequação do efluente tratado à Eletrodialise Reversa  
Fonte: Elaboração própria, a partir de (MACHADO, 2008)*

Parâmetro	Unid.	Saída Filtro de Carvão	Limite para EDR	Adequação
Alumínio	mg/L	0,04	0,1	Ok ✓
Cloro livre	mg/L	0,16	0,5	Ok ✓
COT	mg/L	15,62	15	Limite !
DQO	mg O <sub>2</sub> /L	43,57	50	Ok ✓
Ferro	mg/L	0,04	0,3	Ok ✓
Manganês	mg/L	0,07	0,1	Ok ✓
O&G	mg/L	1,76	2	Ok ✓
Turbidez	NTU	0,29	0,5	Ok ✓

### 2.3. Eletrodialise Reversa

A dessalinização via EDR tem como objetivo a redução da condutividade média do efluente de 1630  $\mu\text{S}/\text{cm}$  para 360  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , o que corresponde a uma média de 370 mg/L a 80 mg/L de cloretos, para possibilitar o reúso como água de reposição na torre de resfriamento.

A unidade empregada (GE 2020) – fornecida pela GE Water & Process Technologies – conta com 2 linhas operando em paralelo, para que sejam respeitados os limites de vazão por módulo (30 m<sup>3</sup>/h). Em cada linha são empregados dois módulos de 600 membranas em série, totalizando 4 equipamentos e 2400 membranas. (CENPES, 2009) Cada equipamento possui aproximadamente 2 m de altura, 1 m de comprimento e 0,5 m de largura, totalizando 1 m<sup>3</sup> por módulo.

São tratados os 80 m<sup>3</sup>/h de água provenientes do filtro a carvão, gerando uma produção de 60 m<sup>3</sup>/h (20 m<sup>3</sup>/h perdidos no concentrado e nos eletrodos). A temperatura média de entrada é de 25°C e há um diferencial de pressão aplicado da ordem de 3 bar entre o fluxo dessalinizado e o fluxo concentrado para garantir que não haja passagem da solução mais concentrada para a menos concentrada. (CENPES, 2009)

A voltagem aplicada e a corrente gerada por módulo é de 250 a 440 V e de 10 a 40 A, respectivamente. Considerando que há uma eficiência da corrente de 75 a 92%, chega-se a um consumo máximo para os 4 módulos de aproximadamente 90 kW e um consumo médio de 45 kW (CENPES, 2009).



*Figura 13. Unidade GE 2020 fornecida pela GE Water & Process Technologies  
Fonte: <https://knowledgecentral.gewater.com>*

Os valores das análises realizadas na entrada e saída desta etapa se encontram na Tabela 8.

*Tabela 8. Remoção paramétrica no Clarificado pós-Eletrodialise Reversa*

*Fonte: Elaboração própria a partir de dados fornecidos pela PETROBRAS*

Parâmetro	Unid.	Saída Filtro de Carvão					Saída Clarificado EDR					Varição
		Média	Cont.	Var.	Máx.	Mín.	Média	Cont.	Var.	Máx.	Mín.	Δ%
Alcalinidade	mg/L	83,39	28	37,37	177,4	41,6	37,84	222	23,62	115	6	55%
Alumínio	mg/L	0,04	41	0,05	0,2	0,01	0,03	34	0,04	0,2	0,01	32%
Amônia	mg/L	5,90	205	4,24	18,1	0,03	0,95	166	1,57	24,6	0,01	84%
Bário	mg/L	0,28	51	0,07	0,41	0,01	0,04	34	0,03	0,13	0,01	87%
Bicarbonato	mg/L	216,35	4	29,37	243,4	184,7	107,03	3	13,36	119,6	93	51%
Cálcio	mg/L	54,88	40	7,90	68	39	4,84	32	2,22	10	0,05	91%
Cloretos	mg/L	370,31	100	54,72	574,4	163,14	77,54	164	43,15	708,77	17,7	79%
Condutividade	μS/cm	1629,57	223	212,36	2160	1085	363,84	222	110,38	973	127,6	78%
COT	mg/L	15,62	210	2,92	26,5	8,19	11,84	216	2,14	17,69	4,09	24%
DBO	mg O <sub>2</sub> /L	22,51	39	26,37	105,00	1,00	10,60	27	13,95	46,00	1,20	53%
DQO	mg O <sub>2</sub> /L	43,57	160	29,92	187	5	42,02	75	19,19	96	2	4%
Dureza	mg/L	170,29	172	43,88	288	0,1	21,90	136	22,54	276,4	0,4	87%
Ferro	mg/L	0,04	72	0,03	0,18	0,01	0,02	65	0,02	0,1	0,01	57%
Magnésio	mg/L	6,49	42	2,01	14	0,01	0,62	34	0,28	1,3	0,01	90%
Manganês	mg/L	0,07	41	0,05	0,24	0,01	0,02	33	0,03	0,1	0,01	73%
O&G	mg/L	1,76	10	1,25	4,3	0,23	1,93	5	1,00	3,3	0,88	-10%
pH	adim.	7,30	28	0,42	8,63	6,51	7,36	22	0,48	8,55	6,6	-1%
Sílica	mg/L	15,93	42	4,34	21,43	2,14	17,11	34	4,06	23,57	2,36	-7%
Sódio	mg/L	255,74	38	44,38	350	167	69,16	31	23,49	118	35	73%
SDT	mg/L	757,36	47	98,31	918	535	177,46	39	55,54	276	89	77%
Sulfato	mg/L	87,11	584	18,08	152,9	30,9	20,85	88	22,98	247,59	3,15	76%
Turbidez	NTU	0,29	195	0,27	1,96	0,02	0,22	156	0,26	1,06	0,02	24%

Analisando-se a eficiência energética do processo, como são tratados 72 m<sup>3</sup>/h nos dois estágios com a utilização de, em média, 45 kW de energia elétrica para remoção de, em média, 0,5 kg/m<sup>3</sup> de SDT, são utilizados 1,25 kWh/kg SDT removido/m<sup>3</sup> tratado. Este valor está um pouco acima do estipulado pela literatura (0,7 kWh/kg SDT removido/m<sup>3</sup> tratado).

Da Tabela 9 pode-se avaliar a adequação do efluente de acordo com os limites estabelecidos pela EPA (reduzidos de acordo com o ciclo de concentração da Torre de Resfriamento como explicado acima). Nota-se que apesar de haver valores bem acima dos limites recomendados, em geral a água apresenta níveis adequados em relação aos parâmetros mais críticos de corrosão e formação de depósitos (Cloretos, Ferro, Dureza, Turbidez).

Tabela 9. Adequação da água de reúso final à Torre de Resfriamento

Fonte: Elaboração própria a partir de (US-EPA, 1992)

Parâmetro	Unid.	Saída EDR	Limite Ajustado	Adequação
Alcalinidade	mg/L	37,84	70	Ok ✓
Alumínio	mg/L	0,03	0,02	Limite !
Amônia	mg/L	0,95	0,20	Não ✗
Cálcio	mg/L	4,84	10	Ok ✓
Cloretos	mg/L	77,54	100	Ok ✓
Condutividade	µS/cm	363,84	600	Ok ✓
DBO	mg O <sub>2</sub> /L	10,60	5	Não ✗
DQO	mg O <sub>2</sub> /L	42,02	15	Não ✗
Dureza	mg/L	21,90	80	Ok ✓
Ferro	mg/L	0,06	0,1	Ok ✓
Magnésio	mg/L	0,62	0,1	Não ✗
Manganês	mg/L	0,02	0,1	Ok ✓
pH	adim.	7,36	6,9 – 8,5	Ok ✓
Sílica	mg/L	17,11	10	Não ✗
SDT	mg/L	177,46	100	Não ✗
SST	mg/L	9,07*	20	Ok ✓
Sulfato	mg/L	20,85	40	Ok ✓
Turbidez	NTU	0,22	4	Ok ✓

\* O valor referente aos sólidos em suspensão totais (SST) se refere à análise feita na saída do filtro de carvão.

Não há atendimento em relação a seis parâmetros, a saber:

- A Amônia, a DBO e a DQO, que estão relacionadas, e que podem levar a geração de *biofouling* no sistema de resfriamento. Além disso, a Amônia pode ocasionar a corrosão das ligas de cobre;
- Apesar de a EDR remover o Magnésio em 90%, sua concentração de entrada é elevada e não atende o limite imposto. O Magnésio pode levar a formação de incrustações, o que não ocorre graças à baixa dureza da água tratada;
- A Sílica depassa o limite imposto e pode formar depósitos. Esta substância não é muito bem removida na EDR por ser apolar;
- Os sólidos Dissolvidos Totais (SDT) ultrapassam o limite e corroboram a possibilidade de formação de depósito e *fouling*.

A água saindo do tratamento possui a qualidade necessária para ser reutilizada como água de reposição no sistema de resfriamento, havendo, porém algumas ressalvas a serem observadas em relação a algumas substâncias, que podem prejudicar o desempenho do trocador de calor.

---

Findas a revisão bibliográfica relacionada aos assuntos pertinentes à análise de cada uma das etapas do processo de Tratamento Terciário da REGAP, segue-se com a modelagem matemática que possibilita a simulação de seu comportamento, objetivo principal deste trabalho.

## IV. MODELAGEM E SIMULAÇÃO DO TRATAMENTO TERCIÁRIO

---

Na análise de um sistema, o engenheiro de processos tem como dupla função modelar o conjunto de equações que o descreve e resolvê-las para um determinado problema de dimensionamento ou simulação (PERLINGEIRO, 2005).

Nessa seção, será exposto o modelo matemático proposto para os equipamentos que compõem o Tratamento Terciário da REGAP e em seguida, o mesmo será testado através de uma simulação.

### 1. Modelagem do Tratamento Terciário

A modelagem matemática de um processo visa traduzir o comportamento real observado para uma linguagem matemática, que permitirá realizar previsões futuras de resposta do sistema, determinar as melhores condições operacionais e, em última instância, avaliar sua adequação aos requisitos impostos ou sua viabilidade econômica.

Segundo PERLINGEIRO (Engenharia de Processos, 2005), o modelo matemático de um processo é formado pelo conjunto de modelos dos equipamentos e de uma representação do fluxograma estudado. O modelo de um equipamento é por sua vez constituído das equações representativas dos fenômenos que regem seu comportamento, tais como balanços materiais, balanços de energia, relações de equilíbrios de fases, equações de dimensionamento e outras. Quanto mais variáveis estão presentes na descrição do sistema, mais complexa sua análise. Para via de simplificação, será adotada a aproximação que toda corrente líquida estudada se comporta como uma solução ou mistura ideal.

No total, 23 parâmetros foram analisados ao longo do tratamento. Os  $N_i$  parâmetros que entraram na modelagem foram separados em três grupos:

- **Grupo 1:** Parâmetros Relevantes: Parâmetros cujo abrandamento foi analisado ao longo de todo o processo de tratamento e que são considerados no cálculo da densidade do efluente. Compõem: COT, Ferro, Óleos e Graxas, Sílica, SDT e SST. Total: 6 parâmetros;
- **Grupo 2:** Parâmetros de Controle EDR: Parâmetros cujo abrandamento foi determinado apenas na passagem pela EDR, mas que são considerados no cálculo da densidade do efluente. São: Alcalinidade, Alumínio, Amônia, Bário, Bicarbonato, Cálcio, Cloretos, Magnésio, Manganês, Sódio e Sulfato. Total: 11 parâmetros;
- **Grupo 3:** Parâmetros Operacionais: Parâmetros cujo abrandamento foi estudado ao longo do processo de tratamento, mas que não foram considerados no cálculo da densidade, nem puderam ser incluídos no Balanço de Massa para determinar qualidade do Lodo e do Concentrado da EDR. Fazem parte: Condutividade, DBO, DQO, Dureza, pH e Turbidez. Total: 6 parâmetros.

Serão descritos a seguir os modelos matemáticos de cada um dos equipamentos presentes no tratamento terciário de efluentes da REGAP.

## 1.1. Clarificação Avançada e Filtro de Areia

A combinação Clarificação Avançada e Filtro de Areia, como foi explicado anteriormente, tem por objetivo a remoção da maior parte dos sólidos em suspensão total e da turbidez.

A Clarificação Avançada acontece no Actiflo<sup>®</sup>, um equipamento modular da Veolia Water Solutions, enquanto o Filtro de Areia (FA) é um filtro de areia a gravidade convencional.

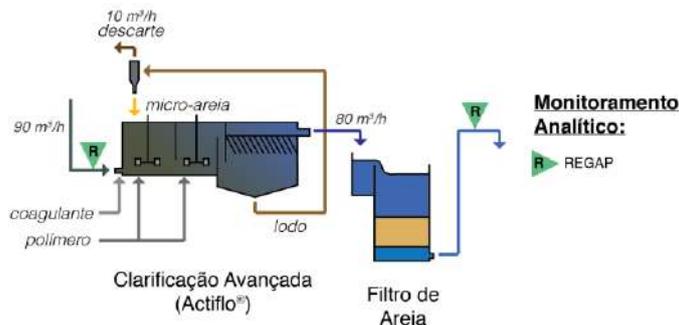


Figura 14. Modelagem Actiflo<sup>®</sup> + Filtro de Areia  
Fonte: Elaboração própria

Em relação à remoção paramétrica, estes dois equipamentos foram interpretados como um sistema único. Considerando que não há acúmulo de massa no Actiflo<sup>®</sup> e que não ocorre reação nos equipamentos, pode-se realizar um balanço de massa para cada um das substâncias  $i$ : a massa de  $i$  que entra se dividirá parte no lodo e parte no clarificado, havendo ainda parte acumulada no filtro de areia.

Em termos de Fluxos Mássicos ( $FM$ ), para cada substância  $i$  temos:

$$FM \text{ que entra} = FM \text{ que sai} + FM \text{ que acumula} - FM \text{ que reage}$$

$$FM_{i_{Biod}} = FM_{i_{FA}} + FM_{i_{Lodo}} + FM_{i_{retidoFA}} \left[ \frac{g}{h} \right]$$

Mas no caso das correntes, o fluxo mássico é o produto da vazão mássica pela concentração do parâmetro  $i$  na corrente:

$$FM_{i_{Biod}} = C_{i_{Biod}} \cdot Q_{Biod} \left[ \frac{g}{h} \right]$$

$$FM_{i_{FA}} = C_{i_{FA}} \cdot Q_{FA} \left[ \frac{g}{h} \right]$$

$$FM_{i_{Lodo}} = C_{i_{Lodo}} \cdot Q_{Lodo} \left[ \frac{g}{h} \right]$$

Deve-se considerar ainda que a taxa de massa retida no filtro de areia, para a substância  $i$ , é pequena em relação à quantidade que sai no lodo (5%), assim:

$$FM_{i_{retidoFA}} = 0,05 \cdot FM_{i_{Lodo}} \left[ \frac{g}{h} \right]$$

Pode-se entender que a massa da substância  $i$  que fica retida no filtro de areia sairá na corrente de lavagem e que, assim, o acúmulo é temporário. Este conceito é importante, pois caso contrário, o filtro colmataria e não ocorreria a filtração.

Em relação ao Balanço de massa Global, tem-se assim:

$$C_{i_{Biod}} \cdot Q_{Biod} = 1,05 \cdot C_{i_{Lodo}} \cdot Q_{Lodo} + C_{i_{FA}} \cdot Q_{FA} \quad \left[ \frac{g}{h} \right]$$

Pode-se obter a concentração de saída do parâmetro  $i$  como uma função da concentração de entrada do parâmetro no sistema Actiflo®+FA.

Função de Remoção:  $\Delta_{i_{FA}} = f(C_{i_{Biod}})$  [%]

Concentração de Saída:  $C_{i_{FA}} = C_{i_{Biod}}(1 - \Delta_{i_{FA}})$   $\left[ \frac{g}{m^3} \right]$

*Em relação a esta aproximação, devem-se fazer as seguintes observações. Neste trabalho, estas funções ( $f_{\Delta i}$ ) foram determinadas empiricamente a partir da correlação entre Remoção Paramétrica e Concentração de Entrada, levando-se em consideração os dados históricos disponíveis e através de regressão que mais se adaptava ao caso.*

*Na maioria das vezes, o tipo de regressão que mais condissse com o comportamento observado foi a regressão logarítmica. Uma explicação plausível está no fato de que a remoção é naturalmente fraca quando a concentração de entrada da substância é baixa, aumentando rapidamente e se estabilizando em seguida.*

*Quando o valor de  $R^2$  da linha de tendência era inferior a 0,3 foi utilizado como função de ligação entre Remoção Paramétrica e Concentração de Entrada o percentual de remoção histórico médio. Quando não havia dados disponíveis para análise entre Entrada-Saída concomitantemente, foi adotada remoção nula para a substância.*

*Em anexo podem ser encontrados os gráficos de “Remoção em função da Concentração de Entrada” para cada um dos parâmetros relevantes para a etapa, com suas respectivas funções ( $\Delta_{i_{etapa}} = f(C_{i_{etapa \text{ anterior}}})$  [%]) ou constantes de remoção adotadas.*

Os resultados analíticos estão disponíveis apenas para a entrada do Actiflo® e para a saída do FA, não sendo interessante realizá-los para se determinar a qualidade do lodo. A concentração no lodo pode então ser obtida por:

$$C_{i_{Lodo}} = \frac{C_{i_{Biod}} \cdot Q_{Biod} - C_{i_{FA}} \cdot Q_{FA}}{1,05 \cdot Q_{Lodo}} \quad \left[ \frac{g}{m^3} \right]$$

Assim, a densidade de cada um dos efluentes hídricos pode ser escrita simplificadamente como:

$$\rho_{efluente} = \rho_{\text{água}} + \sum_i \frac{C_{i_{efluente}}}{1000} \quad \left[ \frac{kg}{m^3} \right] \quad (\text{fórmula simplificada})$$

#### (i) A Clarificação Avançada em Actiflo®

O Actiflo®, por ser uma unidade comercialmente modular, não foi dimensionado. De fato, segundo dados da (PETROBRAS, 2004) a unidade de Actiflo® da REGAP tem Taxa de Aplicação Superficial de até 80 m/h (ou m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.h).

Como foi exposto, o Actiflo® é dividido em 4 partes: mistura rápida (canal de 4,5 m<sup>3</sup> + câmara de 2,4 m<sup>3</sup>); injeção (câmara de injeção de 2,4 m<sup>3</sup>); mistura lenta (câmara de 8,6 m<sup>3</sup>) e sedimentação (2 ramais de 4,5 m<sup>3</sup>).

O volume total do equipamento é assim de 26,9 m<sup>3</sup> ( $V_{Actflo}$ ) e o tempo de residência hidráulica do Actiflo® ( $TRH_{Actflo}$ ) pode ser calculado então como a razão do volume total do equipamento pela vazão:

$$TRH_{Actflo} = \frac{V_{Actflo}}{Q_{Biod}} \cdot 60 \quad [\text{min}]$$

Em relação à injeção de coagulante (Policloreto de Alumínio – PAC Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), estudos de bancada realizados pelo LabTare mostraram que há uma relação entre a remoção da Turbidez e a concentração de coagulante na entrada (função de relação encontrada também em anexo).

$$\Delta_{Turb_{Actflo}} = g(C_{coag}) = g(C_{PAC}) \quad [\%]^2$$

A concentração de PAC padrão empregada na REGAP é de 7 a 12 mg/L. Pode-se considerar que a maior remoção de Turbidez se dá no Actiflo® (95%). Para este equipamento a função de remoção deve ser calibrada levando em conta a concentração de coagulante aplicada (concentração média de 10 mg/L).

Assim, para o sistema composto dos dois equipamentos, a função de remoção pode ser modificada para a seguinte função:

$$\begin{aligned} \Delta_{Turb_{FA}} &= 95\% \cdot \frac{g(C_{PAC})}{g(C_{PAC}=10 \frac{mg}{L})} \cdot f(C_{Turb_{Biod}}) + 5\% \cdot f(C_{Turb_{Biod}}) \quad [\%] \\ \Delta_{Turb_{FA}} &= f_1(C_{Turb_{Biod}}, C_{PAC}) \quad [\%] \\ Turb_{FA} &= Turb_{Biod} \cdot (1 - \Delta_{Turb_{FA}}) \quad [NTU] \end{aligned}$$

O PAC é também um coagulante que reduz o pH do efluente. Neste sentido, o mesmo raciocínio pode ser utilizado para se modelar a diminuição de pH após os equipamentos Actiflo® & FA.

$$\begin{aligned} \Delta_{pH_{Actflo}} &= h(C_{coag}) = h(C_{PAC}) \quad [\%] \\ \Delta_{pH_{FA}} &= 95\% \cdot \frac{h(C_{PAC})}{h(C_{PAC}=10 \frac{mg}{L})} \cdot f(C_{pH_{Biod}}) + 5\% \cdot f(C_{pH_{Biod}}) \quad [\%] \\ \Delta_{pH_{FA}} &= f_2(C_{pH_{Biod}}, C_{PAC}) \quad [\%] \\ pH_{FA} &= pH_{Biod} \cdot (1 - \Delta_{pH_{FA}}) \quad [adim] \end{aligned}$$

Segundo Priscilla Florido, da operação do Reúso de Águas da REGAP, o coagulante é injetado através de uma bomba dosadora a partir de um produto concentrado ( $C_{PAC/conc}=152 \text{ g/L}$ ). A partir de uma determinada vazão de operação, a concentração diluída desejada é atingida através de um fluxo mássico de injeção de coagulante, ao qual corresponde também uma vazão:

$$Q_{PAC} = \frac{C_{coag} \cdot Q_{Biod}}{C_{coagconc}} \quad \left[ \frac{L}{h} \right]$$

<sup>2</sup> As funções de remoção ( $f$ ,  $g$  ou  $h$ ) e seus respectivos gráficos com curvas de tendência estão em anexo.

Em relação ao polímero utilizado, não há informações disponíveis acerca da influência da concentração de injeção na remoção da Turbidez. O polímero utilizado é, na câmara de mistura rápida, o Bulab (da Buckman), a uma concentração de 5 mg/L ( $C_{pol1}$ ); e, na câmara de mistura lenta, o Kurifloc (da Kurita), a uma concentração de 0,3 mg/L ( $C_{pol2}$ ). A bomba dosadora é ajustada para atingir essa concentração em função da vazão de entrada. Levando em consideração que a concentração de cada um dos produtos concentrados é  $C_{pol1/conc} = 63$  g/L e  $C_{pol2/conc} = 1$  g/L (dados fornecidos por Priscilla Florido), teremos as seguintes vazões de polímero:

$$Q_{pol1} = \frac{C_{pol1} \cdot Q_{Biod}}{C_{pol1/conc}} \quad \left[ \frac{L}{h} \right] \quad \text{e} \quad Q_{pol2} = \frac{C_{pol2} \cdot Q_{Biod}}{C_{Kurif/conc}} \quad \left[ \frac{L}{h} \right]$$

Supondo que todo coagulante e todo polímero saem no lodo, a densidade desta corrente pode ser adaptada para:

$$\rho_{lodo} = \rho_{\acute{a}gua} + \frac{\sum_i C_{i_{lodo}} + C_{coag} + C_{pol1} + C_{pol2}}{1000} \quad \left[ \frac{kg}{m^3} \right]$$

## (ii) O Filtro de Areia

O filtro de areia (FA) empregado na REGAP pode ser dimensionado a partir da taxa de filtração ( $m^3$  passante/ $m^3$  de material filtrante) aplicada ao mesmo. Por se tratar de uma unidade protótipo, há dois filtros em operação em paralelo.

A vazão entrante no filtro será a diferença entre a vazão entrante na Clarificação Avançada e a vazão de lodo. E como não há desvio hidráulico, a vazão após o filtro de areia será igual à vazão entrante.

$$Q_{FA} = Q_{Actflo} = Q_{Biod} - Q_{Lodo} \quad \left[ \frac{m^3}{h} \right]$$

Segundo RITCHER & NETTO (Tratamento de Água Tecnologia Atualizada, 1991) em um projeto de estação de tratamento de água para abastecimento público (a ser adotado aqui dado o grau de pureza final desejado), o seguinte limite para a taxa de filtração deve ser respeitado:  $TF_{FA} = 180$   $m^3/m^2 \cdot dia$ .

Para conseguir definir a área mínima do filtro de areia, deve-se utilizar a vazão máxima de operação. A vazão máxima é aquela saindo da Clarificação Avançada para uma produção mínima de lodo, e pode ser considerada igual a 80  $m^3/h$  ( $Q_{Actflo\_Proj}$ ). Assim, a área mínima do FA ( $A_{FA}$ ) será dada por:

$$A_{FAmin} = \frac{24 \cdot Q_{ActfloProj}}{TF_{FA}} \quad [m^2]$$

O filtro de areia usual tem altura mínima de 3,10 m (RITCHER & NETTO, 1991) e o tempo de residência hidráulica nesse equipamento será:

$$TRH_{FA} = \frac{A_{FA} \cdot h_{FA}}{Q_{FA}} \cdot 60 \quad [min]$$

Não é tratada aqui a questão da lavagem dos filtros e da expansão do material filtrante por não se enquadrarem no objeto deste trabalho.

## 1.2. Filtro de Carvão Ativado Granular

A etapa de adsorção sobre carvão ativado granular (CAG) no tratamento terciário da REGAP visa à remoção de Carbono Orgânico Total (COT) para evitar o problema de fouling orgânico nas membranas da Eletrodiálise Reversa.

Como visto, esta etapa é composta de três filtros projetados para operar em sistema carrossel (dois filtros operando em série enquanto o terceiro aguarda a saturação do primeiro leito para entrar em operação).

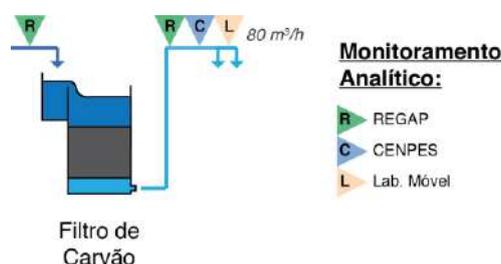


Figura 15. Modelagem Filtro Adsorvedor de Carvão

Fonte: Elaboração própria

Não há desvio de vazão nesta operação. Cada filtro adsorvedor de carvão tem área da seção transversal ( $A_{carvão}$ ) igual a  $6,2 \text{ m}^2$  e o volume total de leito ( $V_{carvão}$ ) igual a  $9,3 \text{ m}^3$ . O tempo de residência hidráulica considerando dois filtros de operação pode ser dado como segue:

$$Q_{carvão} = Q_{FA} \left[ \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right]$$

$$TRH_{carvão} = \frac{Q_{FA}}{2 \cdot V_{carvão}} \cdot 60 \quad [\text{min}]$$

Em relação à remoção após passagem pelo filtro de carvão de cada uma das substâncias  $i$  presentes na água efluente do filtro de areia, um procedimento análogo ao da operação anterior foi adotado. Ou seja, a remoção do parâmetro será uma função determinada empiricamente a partir de dados do monitoramento analítico. As funções de remoção para cada substância/parâmetro estão descritas também no Anexo.

$$\text{Função de Remoção: } \Delta_{i_{carvão}} = f(C_{i_{FA}}) \quad [\%]$$

$$\text{Concentração de Saída: } C_{i_{carvão}} = C_{i_{FA}} (1 - \Delta_{i_{carvão}}) \quad \left[ \frac{\text{g}}{\text{m}^3} \right]$$

Ensaio realizados por TOUMA (Testes Acelerados em Colunas de Pequena Escala: O uso de Carvão Ativado Granular em projetos de reúso de efluentes de Refinarias de Petróleo, 2013) na unidade de CAG utilizada na REGAP determinaram a capacidade de remoção do COT para os dois filtros de carvão operando em série. Foi observado “que a saturação do CAG em escala industrial ocorreu prematuramente, em cerca de 10 a 20 dias de operação contínua com o efluente secundário clarificado (1000 a 2000 leitões filtrados)”. No entanto, estes ensaios permitiram também determinar uma função relacionando a saturação dos filtros (perda da capacidade de remoção)

e o tempo de operação / volume de leitos filtrados pelos dois filtros em série – a chamada curva de ruptura do leito.

O volume de leitos filtrados é dado pelo produto entre o tempo transcorrido (em dias) a partir da posta em operação do carvão virgem e a razão entre vazão entrante e volume dos dois leitos de carvão. É de se esperar que a remoção decaia à medida que os poros do carvão se preencham, assim é importante conhecer o tempo zero de ativação do carvão.

$$V_{\text{leitos filtrados}} = 24 \cdot \Delta t_{\text{carvão ativado}} \cdot \frac{Q_{FA}}{2 \cdot V_{\text{carvão}}} \quad [adim]$$

$$\text{Onde, } \Delta t_{\text{carvão ativado}} = t - t_0 (\text{carvão virgem}) \quad [d]$$

A função de remoção de Carbono Orgânico Total em função do número de leitos filtrados foi

$$\Delta_{COT_{\text{carvão}}} = g(V_{\text{leitos filtrados}}) = -0,098 \cdot \ln(V_{\text{leitos filtrados}}) + 0,986 \quad [\%]$$

O fato de a remoção histórica média de COT na etapa ser de 7% (cf. Tabela 6) revela que a operação é levada a cabo com o carvão já totalmente saturado (mais de 11400 leitos filtrados). A função de remoção que considera os leitos filtrados deve então ser calibrada para considerar a reposição de um carvão ativado virgem.

$$\Delta_{COT_{\text{carvão calib}}} = \frac{g(V_{\text{leitos filtrados}})}{g(V_{\text{leitos filtrados}}=11.400)} \quad [\%]$$

A remoção de COT varia, nesse caso, conforme a saturação do carvão. Desta maneira, é possível prever no modelo, a partir de uma determinada data de análise, a remoção de COT. Assim, para os compostos refratários (COT) a remoção total será dada pelo produto das duas funções estudadas:

$$\Delta_{COT_{\text{carvão}}} = f(C_{COT_{FA}}) \cdot \frac{g(V_{\text{leitos filtrados}})}{g(V_{\text{leitos filtrados}}=11.400)} \quad [\%]$$

$$\Delta_{COT_{\text{carvão}}} = f_1(C_{COT_{FA}}, V_{\text{leitos filtrados}}) \quad [\%]$$

Ainda segundo (TOUMA, 2013), o leito principal de adsorção teve saturação total após 48 dias de operação (coincidência entre curva de alimentação e saída). Este, porém, foi o resultado operando-se a 75 m<sup>3</sup>/h. O tempo remanescente para reativação do leito principal pode ser determinado em função da vazão de operação aplicada.

$$t_{\text{reativação}} = 48 \cdot \frac{Q_{FA}}{75} - \Delta t_{\text{carvão ativado}} \quad [d]$$

A densidade do efluente pós-adsorção é calculada como segue:

$$\rho_{\text{carvão}} = \rho_{\text{água}} + \sum_i \frac{C_{i_{\text{carvão}}}}{1000} \quad \left[ \frac{kg}{m^3} \right]$$

### 1.3. Eletrodíálise Reversa

A etapa de Eletrodiálise Reversa tem como objetivo a dessalinização da água para torná-la menos corrosiva/encrustante e, assim, adequá-la ao uso na torre de resfriamento.

Nesta etapa, são utilizados 4 equipamentos modulares (GE 2020) de 1 m<sup>3</sup> da GE Water & Process Technologies, dispostos em 2 linhas com 2 módulos cada uma.

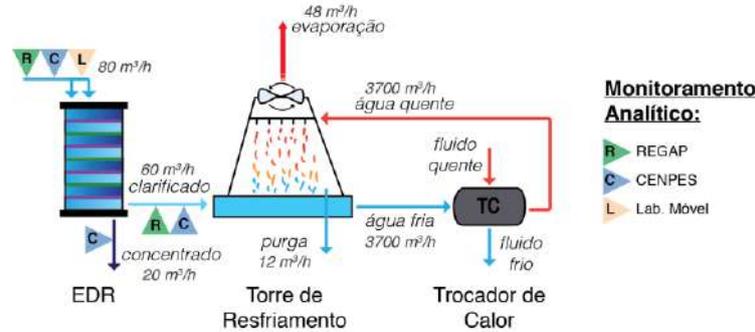


Figura 16. Modelagem Eletrodiálise Reversa  
Fonte: Elaboração própria

Como foi explicado anteriormente, a água entrante se divide em dois fluxos entre os quais ocorre a troca iônica sem haver, no entanto mistura hídrica. A vazão proveniente do filtro de carvão é repartida entre a vazão tratada da EDR e a vazão concentrada em sais e pode ser expressa como segue:

$$Q_{carvao} = Q_{EDR} + Q_{conc} \quad \left[ \frac{m^3}{h} \right]$$

O tempo de residência hidráulica nesta etapa, considerando 4 módulos é:

$$TRH_{EDR} = \frac{V_{Tot\ EDR}}{Q_{carvao}} \cdot 60 = \frac{4 \cdot V_{EDR}}{Q_{carvao}} \cdot 60 \quad [min]$$

Em relação aos íons e substâncias ionizáveis, pode-se realizar um balanço de massa por componente, através do fluxo mássico e da concentração correspondente:

$$FM_{i_{carvao}} = FM_{i_{EDR}} + FM_{i_{conc}} \quad \left[ \frac{g}{h} \right]$$

$$Q_{carvao} \cdot C_{i_{carvao}} = Q_{EDR} \cdot C_{i_{EDR}} + Q_{conc} \cdot C_{i_{conc}} \quad \left[ \frac{g}{h} \right]$$

Novamente, recorre-se aos dados históricos para determinar a concentração de saída da operação em função da concentração de entrada. As funções de remoção utilizadas se encontram em anexo.

$$\text{Função de Remoção: } \Delta_{i_{EDR}} = f(C_{i_{carvao}}) \quad [%]$$

$$\text{Concentração de Saída: } C_{i_{EDR}} = C_{i_{carvao}} (1 - \Delta_{i_{EDR}}) \quad \left[ \frac{g}{m^3} \right]$$

A concentração no concentrado pode ser determinada analogamente à concentração do lodo na etapa do Actiflo®:

$$C_{i_{conc}} = \frac{C_{i_{carvao}} \cdot Q_{carvao} - C_{i_{EDR}} \cdot Q_{EDR}}{Q_{conc}} \quad \left[ \frac{g}{m^3} \right]$$

A densidade de cada uma das correntes pode ser expressa como segue:

$$\rho_{EDR} = \rho_{\text{água}} + \sum_i \frac{C_{iEDR}}{1000} \left[ \frac{kg}{m^3} \right]$$

$$\rho_{conc} = \rho_{\text{água}} + \sum_i \frac{C_{iconc}}{1000} \left[ \frac{kg}{m^3} \right]$$

A potência elétrica necessária para o funcionamento da etapa, incluindo bombeamento e dessalinização pode ser simplificada sob a forma apresentada anteriormente e modificada para levar em consideração a eficiência de remoção da etapa atual da REGAP (1,25 kWh/kg SDT removido/m<sup>3</sup> tratado):

$$Pot_{EDR} = 0,7 \frac{kWh}{m^3_{prod}} \cdot Q_{EDR} + 1,25 \frac{kWh}{kgTDS_{remov} \cdot m^3_{prod}} \cdot Q_{EDR} \cdot \Delta C_{SDT} \quad [kW]$$

$$\text{onde: } \Delta C_{SDT} = C_{SDT_{carvao}} - C_{SDT_{EDR}} \quad \left[ \frac{kg}{m^3} \text{ ou } \frac{mg}{L} \right]$$

#### 1.4. Balanço de Informação do Modelo

Na Tabela 10 são listadas as equações que compõem cada etapa do tratamento. Após a modelagem do processo, e antes de sua simulação no computador, é preciso testar a consistência do problema matemático que se apresenta a fim de se garantir o sucesso do procedimento. O problema pode se mostrar consistente (determinado ou indeterminado) ou inconsistente.

Esse teste se dará através de um Balanço de Informação. Os elementos em jogo são: o número  $N_V$  de variáveis; o número  $N_{EQ}$  de equações independentes e o número  $N_E$  de variáveis especificadas, incluindo as conhecidas. Calcula-se, então, os  $G$  graus de liberdade do problema:  $G = N_V - (N_{EQ} + N_E)$ .

O valor e o sinal de  $G$  revelam o tipo de problema:

- $G < 0$ : problema inconsistente, número de incógnitas menor do que o número de equações, solução impossível;
- $G = 0$ : problema consistente determinado, número de incógnitas igual ao número de equações, solução única;
- $G > 0$ : problema consistente, porém indeterminado, número de incógnitas maior do que o número de equações, múltiplas soluções.

Para tornar um problema determinado (de  $G > 0$  para  $G = 0$ ), é necessário atribuir valores a  $G$  variáveis.

Originalmente, tem-se, no caso presente:

- Variáveis:  $N_V = 9 \cdot N_i + 40$  (onde  $N_i$  é o número de parâmetros controlados)
- Equações:  $N_{EQ} = 8 \cdot N_i + 22$
- Grau de Liberdade:  $G = N_V - N_{EQ} = N_i + 18$

No entanto, há dentre essas variáveis, um parâmetro físico (massa específica da água) e variáveis especificadas com valores da prática industrial adotada na REGAP. Esses dois conjuntos totalizam 12 variáveis e seus valores são encontrados na Tabela 11.

*Tabela 10. Conjunto de Equações de Modelagem para o Processo de Tratamento*  
*Fonte: Elaboração própria*

Clarificação + Filtro de Areia		
Equações		N <sub>EQ</sub>
Remoção parâmetro i no FA	$\Delta_{i_{FA}} = f(C_{i_{Biod}})$ [%]	N <sub>i</sub>
Remoção Turbidez e pH Calibrada no FA	$\Delta_{i_{FA}} = f(C_{i_{Biod}}, C_{coag}), se i = \{Turb, pH\}$ [%]	0
Concentração pós-FA	$C_{i_{FA}} = C_{i_{Biod}}(1 - \Delta_{i_{FA}})$ $\left[\frac{g}{m^3}\right]$	N <sub>i</sub>
Vazão jusante FA	$Q_{FA} = Q_{Biod} - Q_{Lodo}$ $\left[\frac{m^3}{h}\right]$	1
Concentração no Lodo	$C_{i_{Lodo}} = \frac{C_{i_{Biod}} \cdot Q_{Biod} - C_{i_{FA}} \cdot Q_{FA}}{1,05 \cdot Q_{Lodo}}$ $\left[\frac{g}{m^3}\right]$	N <sub>i</sub>
Densidade do efluente Biodiscos	$\rho_{Biod} = \rho_{\text{água}} + \sum_i \frac{C_{i_{Biod}}}{1000} \left[\frac{kg}{m^3}\right]$	1
Densidade do clarificado FA	$\rho_{FA} = \rho_{\text{água}} + \sum_i \frac{C_{i_{FA}}}{1000} \left[\frac{kg}{m^3}\right]$	1
Densidade do Lodo	$\rho_{Lodo} = \rho_{\text{água}} + \frac{\sum_i C_{i_{Lodo}} + C_{coag} + C_{pol1} + C_{pol2}}{1000} \left[\frac{kg}{m^3}\right]$	1
Tempo de Residência Hidráulica Actiflo®	$TRH_{Actflo} = \frac{V_{Actflo}}{Q_{Biod}} \cdot 60$ [min]	1
Área Mínima do Filtro de Areia	$A_{FAmin} = \frac{24 \cdot Q_{Actfloproj}}{TF_{FA}} [m^2]$	1
Tempo de Residência Hidráulica FA	$TRH_{FA} = \frac{A_{FA} \cdot h_{FA}}{Q_{FA}} \cdot 60$ [min]	1
Vazão Coagulante	$Q_{coag} = \frac{C_{coag} \cdot Q_{Biod}}{C_{coagconc}} \left[\frac{L}{h}\right]$	1
Vazão Polímero 1	$Q_{pol1} = \frac{C_{pol1} \cdot Q_{Biod}}{C_{pol1conc}} \left[\frac{L}{h}\right]$	1
Vazão Polímero 2	$Q_{pol2} = \frac{C_{pol2} \cdot Q_{Biod}}{C_{pol2conc}} \left[\frac{L}{h}\right]$	1
		<b>Nº Equações: 3.N<sub>i</sub> + 10</b>

Filtro de Carvão		
Equações		N <sub>EQ</sub>
Remoção parâmetro i no Carvão	$\Delta_{i_{carvao}} = f(C_{i_{FA}}) \quad [\%]$	N <sub>i</sub>
Remoção COT calibrada no Carvão	$\Delta_{i_{carvao}} = f(C_{i_{FA}}, V_{leitros\ filtrados}), se\ i = \{COT\} \quad [\%]$	0
Concentração parâmetro i pós-Carvão	$C_{i_{carvao}} = C_{i_{FA}}(1 - \Delta_{i_{carvao}}) \quad \left[\frac{g}{m^3}\right]$	N <sub>i</sub>
Densidade adsorvido Carvão	$\rho_{carvao} = \rho_{\acute{a}gua} + \sum_i \frac{C_{i_{carvao}}}{1000} \quad \left[\frac{kg}{m^3}\right]$	1
Vazão jusante carvão	$Q_{carvao} = Q_{FA} \quad \left[\frac{m^3}{h}\right]$	1
Tempo de Residência Hidráulica Carvão	$TRH_{carvao} = \frac{2 \cdot V_{carvao}}{Q_{FA}} \cdot 60 \quad [min]$	1
Volume de leitos de carvão filtrados	$V_{leitros\ filtrados} = 24 \cdot \Delta t_{carvao\ ativado} \cdot \frac{Q_{FA}}{2 \cdot V_{carvao}} \quad [adim]$	1
Tempo de operação do carvão	$\Delta t_{carvao\ ativado} = t - t_0 (carvao\ virgem) \quad [d]$	1
Tempo restante para reativação	$t_{reativ} = 48 \cdot \frac{Q_{FA}}{75} - \Delta t_{carvao\ ativado} \quad [d]$	1
<b>Nº Equações: 2.N<sub>i</sub> + 6</b>		

Eletrodiálise Reversa		
Equações		N <sub>EQ</sub>
Função de Remoção EDR	$\Delta_{i_{EDR}} = f(C_{i_{carvao}}) \quad [\%]$	N <sub>i</sub>
Concentração pós-EDR	$C_{i_{EDR}} = C_{i_{carvao}}(1 - \Delta_{i_{EDR}}) \quad \left[\frac{g}{m^3}\right]$	N <sub>i</sub>
Vazão jusante EDR	$Q_{EDR} = Q_{carvao} - Q_{conc} \quad \left[\frac{m^3}{h}\right]$	1
Concentração no Concentrado Salino EDR i	$C_{i_{conc}} = \frac{C_{i_{carvao}} \cdot Q_{carvao} - C_{i_{EDR}} \cdot Q_{EDR}}{Q_{conc}} \quad \left[\frac{g}{m^3}\right]$	N <sub>i</sub>
Densidade dessalinizado EDR	$\rho_{EDR} = \rho_{\acute{a}gua} + \sum_i \frac{C_{i_{EDR}}}{1000} \quad \left[\frac{kg}{m^3}\right]$	1
Densidade no concentrado	$\rho_{conc} = \rho_{\acute{a}gua} + \sum_i \frac{C_{i_{conc}}}{1000} \quad \left[\frac{kg}{m^3}\right]$	1
Tempo de Residência Hidráulica EDR	$TRH_{EDR} = \frac{V_{Tot\ EDR}}{Q_{carvao}} \cdot 60 = \frac{4 \cdot V_{EDR}}{Q_{carvao}} \cdot 60 \quad [min]$	1
Potência dissipada EDR	$Pot_{EDR} = 0,7 \cdot Q_{EDR} + 1,25 \cdot Q_{EDR} \cdot \Delta C_{SDT} \quad [kW]$	1
Remoção de SDT na EDR	$\Delta C_{SDT} = C_{SDT_{carvao}} - C_{SDT_{EDR}} \quad \left[\frac{kg}{m^3}\right] \text{ ou } \left[\frac{mg}{L}\right]$	1
<b>Nº Equações: 3.N<sub>i</sub> + 6</b>		

*Tabela 11. Parâmetro Físico e Variáveis Especificadas com Valores Industriais*  
*Fonte: Elaboração própria*

Parâmetro Físico	Símbolo	Valor
Massa específica da água	$\rho_{\text{água}}$	1000 kg/m <sup>3</sup>
		Total: 1

Variáveis Especificadas com Valores Industriais	Símbolo	Valor
Volume do Actiflo®	$V_{\text{Actflo}}$	26,9 m <sup>3</sup>
Concentração do coagulante produto	$C_{\text{coagconc}}$	152 g/L
Concentração do polímero 1 empregada	$C_{\text{pol1}}$	5 g/L
Concentração do polímero 1 produto	$C_{\text{pol1conc}}$	63 g/L
Concentração do polímero 2 empregada	$C_{\text{pol2}}$	0,3 g/L
Concentração do polímero 2 produto	$C_{\text{pol2conc}}$	1 g/L
Taxa de filtração recomendada no FA	$TF_{\text{FA}}$	180 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> /dia
Vazão de projeto do Actiflo®	$Q_{\text{Actifloproj}}$	80 m <sup>3</sup> /h
Altura do FA padrão	$h_{\text{FApadrao}}$	3,1 m
Volume do leito de carvão utilizado no Filtro	$V_{\text{carvao}}$	9,3 m <sup>3</sup>
Volume de um módulo de EDR	$V_{\text{EDR}}$	1 m <sup>3</sup>
		Total: 11

- Parâmetro Físico e Variáveis Especificadas com Valores Industriais:  $N_F = 12$

Então, o grau de liberdade  $G$  do problema é a princípio:

- Grau de Liberdade:  $G = N_V - (N_{EQ} + N_F) = N_i + 6$

Para tornar o problema consistente e determinado ( $G = 0$ ) foi adotado o valor das  $N_i + 6$  variáveis listadas na Tabela 12. A Tabela 13 apresenta as  $8.N_i + 22$  incógnitas do problema calculadas pelo programa de simulação através da árvore de cálculo detalhada em anexo.

*Tabela 12. Variáveis Especificadas do Processo*  
*Fonte: Elaboração própria*

Variáveis Especificadas	Símbolo	
Concentração do parâmetro $i$ pós-Biodiscos	$C_{iBiod}$	$N_i$ Especificada
Vazão efluente Biodiscos	$Q_{Biod}$	1 Especificada
Vazão Lodo	$Q_{Lodo}$	1 Especificada
Concentração de coagulante empregada	$C_{coag}$	1 Especificada
Data de análise	$t$	1 Especificada
Data de posta em operação do carvão virgem	$t_0_{\text{carvao virgem}}$	1 Especificada
Vazão concentrado EDR	$Q_{conc}$	1 Especificada
		Total: $N_i + 6$

Tabela 13. Variáveis Calculadas do Processo  
Fonte: Elaboração própria

Variáveis Calculadas	Símbolo	
Vazão pós-FA	$Q_{FA}$	1 Calculada
Vazão de coagulante	$Q_{coag}$	1 Calculada
Vazão de polímero 1	$Q_{pol1}$	1 Calculada
Vazão de polímero 2	$Q_{pol2}$	1 Calculada
Vazão pós-carvão	$Q_{carvao}$	1 Calculada
Vazão dessalinizado pós-EDR	$Q_{EDR}$	1 Calculada
Tempo de operação do carvão ativado	$\Delta t_{carvao\ ativado}$	1 Calculada
Volume de Leitões de Carvão Filtrados	$V_{leitões\ filtrados}$	1 Calculada
Remoção do parâmetro i no FA	$\Delta_{i_{FA}}$	N <sub>i</sub> Calculada
Concentração do parâmetro i pós-FA	$C_{i_{FA}}$	N <sub>i</sub> Calculada
Densidade clarificado pós-FA	$\rho_{FA}$	1 Calculada
Remoção do parâmetro i no Carvão	$\Delta_{i_{carvao}}$	N <sub>i</sub> Calculada
Concentração do parâmetro i pós-Carvão	$C_{i_{carvao}}$	N <sub>i</sub> Calculada
Densidade do adsorvido pós-Carvão	$\rho_{carvao}$	1 Calculada
Remoção do parâmetro i na EDR	$\Delta_{i_{EDR}}$	N <sub>i</sub> Calculada
Concentração do parâmetro i pós-EDR	$C_{i_{EDR}}$	N <sub>i</sub> Calculada
Densidade do dessalinizado pós-EDR	$\rho_{EDR}$	1 Calculada
Densidade efluente Biodiscos	$\rho_{Biod}$	1 Calculada
Concentração do parâmetro i no Lodo	$C_{i_{Lodo}}$	N <sub>i</sub> Calculada
Tempo de Residência Hidráulica Actiflo	$TRH_{Actiflo}$	1 Calculada
Área mínima da seção transversal do FA	$A_{FA_{min}}$	1 Calculada
Densidade Lodo	$\rho_{lodo}$	1 Calculada
Tempo de Residência Hidráulica FA	$TRH_{FA}$	1 Calculada
Tempo de Residência Hidráulica Carvão	$TRH_{carvao}$	1 Calculada
Tempo restante para reativação	$t_{reativ}$	1 Calculada
Concentração do parâmetro i no concentrado EDR	$C_{i_{conc}}$	N <sub>i</sub> Calculada
Densidade do concentrado pós-EDR	$\rho_{conc}$	1 Calculada
Tempo de Residência Hidráulica EDR	$TRH_{EDR}$	1 Calculada
Remoção de SDT na EDR	$\Delta C_{SDT}$	1 Calculada
Potência Dissipada EDR	$Pot_{EDR}$	1 Calculada
		Total: 8.N <sub>i</sub> + 22

## **2. Simulação do Tratamento Terciário**

Nesta seção será feita a simulação do processo de tratamento terciário da REGAP. Na simulação, o modelo matemático é utilizado para reproduzir o comportamento do processo em situações variadas.

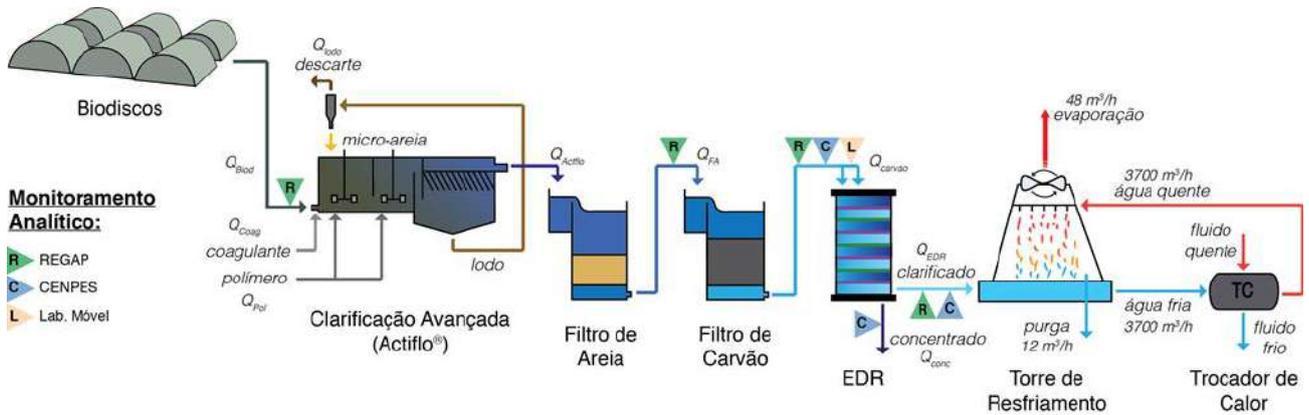
O modelo foi construído no Excel® e separado em duas abas principais. Aquela, chamada “*Sim*”, reunindo as condições operacionais dos equipamentos e os valores dos parâmetros ao longo do tratamento, ou seja, a aba destinada a interface com o usuário e visualização da simulação. A outra, chamada “*Aux*”, reunindo as funções de remoção para cada etapa do tratamento e onde é rodado o modelo matemático do processo em si, através de um código VBA que se encontra em anexo; é assim uma planilha de retaguarda, que alimenta a interface com dados.

### **2.1. Inicialização do Modelo**

A Etapa 0 do Modelo consiste em ajustá-lo ao zero para poder dar início a uma nova simulação, o que pode ser feito com auxílio do botão correspondente.

Para inicialização do Modelo (Etapa 1, visualizada na Figura 17), são inseridas na planilha do Excel® o parâmetro e as variáveis especificadas dos equipamentos do processo, nas células correspondentes (cinza para parâmetro e variáveis especificadas oriundas da prática industrial e vermelho para outras variáveis especificadas).

## Simulação do Tratamento Terciário de Efluentes da REGAP



### Etapa 0.

Início Simulação

Por favor clique no seguinte botão para dar início à simulação:



### Etapa 1.

Inicialização do Modelo

Favor preencher as células em **vermelho** com dados operacionais médios e células em **cinza** com valores fixos.

PROCESSO			Actiflo			Carvão			EDR		
Biodiscos			Clarificado (pós-FA)			Adsorvido (pós-carvão)			Dessalinizado (pós-EDR)		
Condições Operacão Bruto (pós-Biod)	Unid.	Medição	Condições Operacionais Clarificado (pós-FA)	Unid.	Medição	Condições Operacionais Adsorvido (pós-carvão)	Unid.	Medição	Condições Operacionais Dessalinizado (pós-EDR)	Unid.	Medição
Vazão (Q biod)	m <sup>3</sup> /h	90	Vazão (Q FA)	m <sup>3</sup> /h		Vazão (Q carvão)	m <sup>3</sup> /h		Vazão (Q EDR)	m <sup>3</sup> /h	
Densidade	kg/m <sup>3</sup>		Densidade pós-FA	kg/m <sup>3</sup>		Densidade	kg/m <sup>3</sup>		Densidade	kg/m <sup>3</sup>	
Temperatura	°C	21	Actiflo			Equipamentos			Equipamentos		
			Volume Equip	m <sup>3</sup>	26,9	Número Filtros	unid.	2	Número de Ramais	unid.	2
			TRH	min		Volume Leito	m <sup>3</sup>	9,3	Número de Módulos	unid.	2
			• Coagulante (PAC)			TRH	min		Volume Módulo	m <sup>3</sup>	1
			C coag empregada	mg/L	11	Reativação			TRH	min	
			C coag produto	g/L	152	• 1º Filtro			Potencia cons.	kW	
			Vazão coag	L/h		Data reativ. 1º F	data	02/04/2013	Concentrado		
			• Polímero 1 (Bulab)			Δt 1º Filtro	t para reativ.		Vazão (Q conc EDR)	m <sup>3</sup> /h	20
			C pol 1 empregada	mg/L	5	• 2º Filtro			Densidade	kg/m <sup>3</sup>	
			C pol 1 produto	g/L	63	Data reativ. 2º F	data	10/05/2013			
			Vazão pol 1	L/h		Δt 2º Filtro	data				
			• Polímero 2 (Bulab)			t para reativ.	dias				
			C pol 2 empregada	mg/L	0,3	Volumes filtrados	adim.				
			C pol 2 produto	g/L	1						
			Vazão pol 2	L/h							
			• Lodo								
			Vazão (Q lodo)	m <sup>3</sup> /h	10						
			Densidade lodo	kg/m <sup>3</sup>							
			Filtro de Areia (2 em //)								
			Taxa de Filtração	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> /dia	180						
			Área Mínima	m <sup>2</sup>							
			Altura padrão	m	3,1						
			TRH	min							
<b>LEGENDA</b>											
valor fixo de equip.											
variável especificada											
variável calculada											

Figura 17. Etapa 1 de Simulação do Tratamento: Especificação de variáveis

Fonte: Elaboração própria

O cálculo das outras variáveis (células em azul) é feito através do botão de simulação, presente na Etapa 2 (Figura 18).

**Etapa 1.**  
Inicialização do Modelo  
Favor preencher as células em **vermelho** com dados operacionais médios e células em **cinza** com valores fixos.

PROCESSO			Actiflo			Carvão			EDR		
Condições Operacionais	Unid.	Medição	Condições Operacionais	Unid.	Medição	Condições Operacionais	Unid.	Medição	Condições Operacionais	Unid.	Medição
Bruto (pós-Biod)			Clarificado (pós-FA)	m3/h		Adsorvido (pós-carvão)			Dessalinizado (pós-EDR)		
Vazao (Q biod)	m3/h	90	Vazão (Q FA)	m3/h		Vazão (Q carvão)	m3/h		Vazão (Q EDR)	m3/h	
Densidade	kg/m3		Densidade pós-FA	kg/m3		Densidade	kg/m3		Densidade	kg/m3	
Temperatura	°C	21	Actiflo			Equipamentos			Equipamentos		
			Volume Equip	m3	26,9	Número Filtros	unid.	2	Número de Ramais	unid.	2
			TRH	min		Volume Leito	m3	9,3	Número de Módulos	unid.	2
			• Coagulante (PAC)			TRH	min		Volume Módulo	m3	1
			C coag empregada	mg/L	11	Reativação			TRH	min	
			C coag produto	g/L	152	• 1º Filtro			Potencia cons.	kW	
			Vazao coag	L/h		Data reativ. 1º F	data	02/04/2013	Concentrado		
			• Polímero 1 (Bulab)			Δt 1º Filtro	dias		Vazão (Q conc EDR)	m3/h	20
			C pol 1 empregada	mg/L	5	t para reativ.	dias		Densidade	kg/m3	
			C pol 1 produto	g/L	63	• 2º Filtro					
			Vazao pol 1	L/h		Data reativ. 2º F	data	10/05/2013			
			• Polímero 2 (Bulab)			Δt 2º Filtro	dias		Sist. De Resfriamento		
			C pol 2 empregada	mg/L	0,3	t para reativ.	dias		Condições Operacionais	Unid.	Medição
			C pol 2 produto	g/L	1	Volumes filtrados	adim.		Ciclo de Concentração	adim.	5
			Vazao pol 2	L/h							
			• Lodo								
			Vazao (Q lodo)	m3/h	10						
			Densidade lodo	kg/m3							
			Filtro de Areia (2 em //)								
			Taxa de Filtração	m3/m2/dia	180						
			Área Mínima	m2							
			Altura padrão	m	3,1						
			TRH	min							

**LEGENDA**

valor fixo de equip.	
variável especificada	
variável calculada	

**Etapa 2.**  
Simulação do Tratamento  
Favor preencher as células em **vermelho** com valores relativos aos parâmetros na entrada do tratamento.

**SIMULAR TRATAMENTO** →

Figura 18. Etapa 2 de Simulação do Tratamento: Cálculo de Variáveis  
Fonte: Elaboração própria

A densidade do efluente diminui progressivamente a cada etapa, indicando a remoção de substâncias. O tempo de residência hidráulica total é de ao menos 60 min.

Como exposto no início da seção IV.1, os parâmetros são divididos em três grupos (Figura 19): parâmetros relevantes abrandados durante todo o tratamento; parâmetros operacionais abrandados durante todo o tratamento; e parâmetros de controle da EDR que sofrem abrandamento apenas nesta etapa.

As correntes analisadas foram nomeadas conforme o ponto de passagem no tratamento:

- Bruto equivale à corrente de saída dos Biodiscos ( $Q_{Biod}$ );
- Clarificado equivale à corrente de saída da Clarificação + Filtro de Areia ( $Q_{FA}$ ) e Lodo corresponde ao Lodo saído da Clarificação ( $Q_{lodo}$ );
- Adsorvido equivale à corrente de saída do Filtro de Carvão Ativado ( $Q_{carvão}$ );
- Dessalinizado equivale à corrente de saída da EDR ( $Q_{EDR}$ ) e Concentrado corresponde ao Concentrado saído da mesma etapa ( $Q_{conc\_EDR}$ ).

Não é possível determinar, na qualidade do Lodo e do Concentrado Salino da EDR os parâmetros de caráter operacional.

Ao final da simulação do tratamento, a água dessalinizada é comparada quantitativamente com os limites de qualidade recomendados e expostos anteriormente na Tabela 3.



## 2.2. Simulação do Tratamento com Valores Históricos Médios

A primeira simulação visa verificar a adequação do processo existente em relação ao tratamento da água bruta “média” que sai dos Biodiscos para reúso como água de reposição no sistema de resfriamento.

Inicia-se com os valores históricos médios dos parâmetros na entrada dos nos campos em vermelho apresentados na Figura 19 acima. Lança-se a simulação e verificam-se os valores na saída da EDR (Figura 20).

Etapa 2.  
Simulação do Tratamento  
Favor preencher as células em **vermelho** com valores relativos aos parâmetros na entrada do tratamento.

PARÂMETROS Bruto			Clarificado			Adsorvido			Dessalinizado			Lim. Perm.	OK?
Parâmetro	Unid.	Simulação	Parâmetro	Unid.	Simulação	Parâmetro	Unid.	Simulação	Parâmetro	Unid.	Simulação		
COT	mg/L	21,08	COT	mg/L	16,75	COT	mg/L	13,8	COT	mg/L	11,13	-	N/A
Ferro	mg/L	0,83	Ferro	mg/L	0,03	Ferro	mg/L	0,0	Ferro	mg/L	0,01	0,10	✓
O&G	mg/L	4,38	O&G	mg/L	2,96	O&G	mg/L	1,6	O&G	mg/L	1,80	-	N/A
SDT	mg/L	565,17	SDT	mg/L	417,74	SDT	mg/L	417,74	SDT	mg/L	69,73	100,00	✓
Sílica	mg/L	10,44	Sílica	mg/L	7,92	Sílica	mg/L	7,52	Sílica	mg/L	8,05	10,00	✓
SST	mg/L	23,51	SST	mg/L	8,36	SST	mg/L	8,36	SST	mg/L	8,36	20,00	✓
Condutividade	µS/cm	1465,94	Condutividade	µS/cm	1693,14	Condutividade	µS/cm	1634,37	Condutividade	µS/cm	318,60	600,00	✓
DBO	mg O2/L	63,57	DBO	mg O2/L	21,07	DBO	mg O2/L	24,87	DBO	mg O2/L	11,71	5,00	✗
DQO	mg O2/L	89,09	DQO	mg O2/L	41,35	DQO	mg O2/L	30,02	DQO	mg O2/L	30,02	15,00	✗
Dureza	mg CaCO3/L	171,82	Dureza	mg CaCO3/L	159,22	Dureza	mg CaCO3/L	170,29	Dureza	mg CaCO3/L	21,90	80,00	✓
pH	-	7,32	pH	-	7,07	pH	-	7,29	pH	-	7,29	6,9 - 8,5	N/A
Turbidez	NTU	14,28	Turbidez	NTU	0,32	Turbidez	NTU	0,28	Turbidez	NTU	0,21	4,00	✓
Alcalinidade	mg/L	83,39	Alcalinidade	mg/L	83,39	Alcalinidade	mg/L	83,39	Alcalinidade	mg/L	42,25	70,00	✓
Alumínio	mg/L	0,040	Alumínio	mg/L	0,04	Alumínio	mg/L	0,04	Alumínio	mg/L	0,03	0,020	✓
Amônia	mg/L	3,30	Amônia	mg/L	3,30	Amônia	mg/L	3,30	Amônia	mg/L	1,06	0,20	✗
Bário	mg/L	0,26	Bário	mg/L	0,26	Bário	mg/L	0,26	Bário	mg/L	0,03	-	N/A
Bicarbonato	mg/L	216,35	Bicarbonato	mg/L	216,35	Bicarbonato	mg/L	216,35	Bicarbonato	mg/L	107,19	-	N/A
Cálcio	mg/L	54,88	Cálcio	mg/L	54,88	Cálcio	mg/L	54,88	Cálcio	mg/L	3,96	10,00	✓
Cloretos	mg/L	348,38	Cloretos	mg/L	348,38	Cloretos	mg/L	348,38	Cloretos	mg/L	72,95	100,00	✓
Magnésio	mg/L	6,49	Magnésio	mg/L	6,49	Magnésio	mg/L	6,49	Magnésio	mg/L	0,62	0,10	✗
Manganês	mg/L	0,07	Manganês	mg/L	0,07	Manganês	mg/L	0,07	Manganês	mg/L	0,01	0,10	✓
Sódio	mg/L	255,74	Sódio	mg/L	255,74	Sódio	mg/L	255,74	Sódio	mg/L	69,16	-	N/A
Sulfato	mg/L	97,03	Sulfato	mg/L	97,03	Sulfato	mg/L	97,03	Sulfato	mg/L	23,23	40,00	✓

Não Conf. 5

PREENCHER			Lodo			Concentrado EDR		
Média	PREENCHER		Parâmetro	Unid.	Simulação	Parâmetro	Unid.	Simulação
Média +1 σ	PREENCHER		COT	mg/L	53,04	COT	mg/L	33,39
Média -1 σ	PREENCHER		Ferro	mg/L	6,89	Ferro	mg/L	0,04
	PREENCHER		O&G	mg/L	15,02	O&G	mg/L	5,39
			SDT	mg/L	1661,50	SDT	mg/L	209,19
			Sílica	mg/L	29,17	Sílica	mg/L	24,14
			SST	mg/L	137,81	SST	mg/L	25,08
			Condutividade	µS/cm	N/A	Condutividade	µS/cm	N/A
			DBO	mg O2/L	N/A	DBO	mg O2/L	N/A
			DQO	mg O2/L	N/A	DQO	mg O2/L	N/A
			Dureza	mg CaCO3/L	N/A	Dureza	mg CaCO3/L	N/A
			pH	-	N/A	pH	-	N/A
			Turbidez	NTU	N/A	Turbidez	NTU	N/A
			Alcalinidade	mg/L	79,42	Alcalinidade	mg/L	126,75
			Alumínio	mg/L	0,04	Alumínio	mg/L	0,08
			Amônia	mg/L	3,14	Amônia	mg/L	3,18
			Bário	mg/L	0,25	Bário	mg/L	0,10
			Bicarbonato	mg/L	206,05	Bicarbonato	mg/L	321,58
			Cálcio	mg/L	52,27	Cálcio	mg/L	11,87
			Cloretos	mg/L	331,79	Cloretos	mg/L	218,85
			Magnésio	mg/L	6,18	Magnésio	mg/L	1,86
			Manganês	mg/L	0,07	Manganês	mg/L	0,03
			Sódio	mg/L	243,56	Sódio	mg/L	207,49
			Sulfato	mg/L	92,41	Sulfato	mg/L	69,68

Figura 20. Etapa 2 de Simulação do Tratamento: Valores Históricos Médios de Entrada  
Fonte: Elaboração própria

Percebe-se que dentre os 17 parâmetros com limite de qualidade a respeitar (Tabela 14), há 5 que podem, segundo o modelo, apresentar não conformidades e assim danificar o sistema de trocador de calor.

Tabela 14. Simulação para Valores Históricos Médios e potenciais Não Conformidades

Fonte: Elaboração própria

PARÂMETROS			Dessalinizado						
Bruto									
Parâmetro	Unid.	Simulação	Parâmetro	Unid.	Simulação	Lim. Perm.	OK?	Ultrap. Limite	Remoção Início
COT	mg/L	21,08	COT	mg/L	11,13	-	N/A	-	47%
Ferro	mg/L	0,83	Ferro	mg/L	0,01	0,10	✓	-	98%
O&G	mg/L	4,38	O&G	mg/L	1,80	-	N/A	-	59%
SDT	mg/L	565,17	SDT	mg/L	69,73	100,00	✓	-	88%
Sílica	mg/L	10,44	Sílica	mg/L	8,05	10,00	✓	-	23%
SST	mg/L	23,51	SST	mg/L	8,36	20,00	✓	-	64%
Condutividade	µS/cm	1465,94	Condutividade	µS/cm	318,60	600,00	✓	-	78%
DBO	mg O2/L	63,57	DBO	mg O2/L	11,71	5,00	✗	134%	82%
DQO	mg O2/L	89,09	DQO	mg O2/L	30,02	15,00	✗	100%	66%
Dureza	mg CaCO3/L	171,82	Dureza	mg CaCO3/L	21,90	80,00	✓	-	87%
pH	-	7,32	pH	-	7,29	6,9 - 8,5	N/A	-	0%
Turbidez	NTU	14,28	Turbidez	NTU	0,21	4,00	✓	-	99%
Alcalinidade	mg/L	83,39	Alcalinidade	mg/L	42,25	70,00	✓	-	49%
Alumínio	mg/L	0,040	Alumínio	mg/L	0,03	0,020	✗	36%	32%
Amônia	mg/L	3,30	Amônia	mg/L	1,06	0,20	✗	430%	68%
Bário	mg/L	0,26	Bário	mg/L	0,03	-	N/A	-	87%
Bicarbonato	mg/L	216,35	Bicarbonato	mg/L	107,19	-	N/A	-	50%
Cálcio	mg/L	54,88	Cálcio	mg/L	3,96	10,00	✓	-	93%
Cloretos	mg/L	348,38	Cloretos	mg/L	72,95	100,00	✓	-	79%
Magnésio	mg/L	6,49	Magnésio	mg/L	0,62	0,10	✗	519%	90%
Manganês	mg/L	0,07	Manganês	mg/L	0,01	0,10	✓	-	85%
Sódio	mg/L	255,74	Sódio	mg/L	69,16	-	N/A	-	73%
Sulfato	mg/L	97,03	Sulfato	mg/L	23,23	40,00	✓	-	76%

Não Conf. 5

São eles, por ordem de relevância:

- A alta concentração de Magnésio, superior em 5 vezes o recomendado, que pode causar incrustações no sistema de trocador de calor, embora pouco provável dada a baixa dureza total da água;
- A alta concentração de Amônia, superior em 4 vezes o recomendado, em combinada com uma Demanda Química e Bioquímica de Oxigênio também significativa, o que pode causar o fenômeno de *fouling* biológico (formação de colônias de micro-organismos) nas superfícies do sistema de trocador de calor, além da corrosão das ligas de cobre;
- A ligeira ultrapassagem da concentração em Alumínio em relação ao limite, que pelo valor marginal, pode ser desprezado.

É importante perceber que o sistema de reúso mostrou-se efetivo na diminuição da concentração de substâncias mais presentes no efluente da refinaria e que poderia corroer o trocador de calor ou acarretar a formação de depósitos.

Este fato é expresso na diminuição em 99% da Turbidez, 88% da concentração em Sólidos Dissolvidos Totais, 87% da Dureza Total e 64% da concentração em Sólidos em Suspensão Totais. O caso pode ser detalhado para os seguintes itens:

- Diminuição em mais de 70% da concentração inicial de elementos que poderiam formar depósitos e incrustações como Ferro (98%), Magnésio (90%), Bário (87%), Manganês (85%), Sódio (73%);
- Diminuição de 79% da concentração inicial de Cloretos, íon com alto poder corrosivo, e de 76% da de Sulfatos, o que tornou a água menos agressiva (diminuição de 78% da Condutividade).

Segundo o modelo, o sistema se mostrou ineficiente em relação a duas substâncias em particular: a Sílica (diminuição de 23% na concentração inicial) e

Alumínio (redução de 32%). Em relação à Sílica, por ser apolar, ela não é removida na EDR o que pode conferir à água caráter incrustante, com o agravante de as incrustações de sílica serem relativamente duras e aderentes (TROVATI, 2004). Em relação ao Alumínio, a concentração inicial já era extremamente baixa (0,04 mg/L), mas o que mais contribui para o fato de a remoção não ser muito significativa é a adição do coagulante de Policloreto de Alumínio, que injeta no sistema uma quantidade importante desta substância.

Percebe-se ainda que a remoção de moléculas orgânicas não é bem alcançada por esse sistema de tratamento, pois a diminuição de COT é de 51% e a de Óleos e Graxas 59%. Essa nuance do sistema, combinada com uma remoção também moderada de Amônia (68%) pode gerar o ambiente propício para a formação de colônias microbiológicas.

O resultado do modelo proposto pode ser comparado com o resultado real do tratamento (valores históricos médios de monitoramento) para análise de compatibilidade. A Tabela 15 reúne os valores obtidos pela simulação e os valores históricos médios encontrados nas análises de laboratório.

*Tabela 15. Comparativo entre Resultado da Simulação e Análises de Laboratório*  
*Fonte: Elaboração Própria*

Dessalinizado				
Parâmetro	Unid.	Simulação	Real	Diferença (%)
COT	mg/L	11,13	11,84	6%
Ferro	mg/L	0,01	0,02	36%
O&G	mg/L	1,80	1,93	7%
SDT	mg/L	69,73	177,46	61%
Sílica	mg/L	8,05	17,11	53%
SST	mg/L	8,36	9,07	8%
Condutividade	µS/cm	318,60	363,84	12%
DBO	mg O2/L	11,71	10,60	11%
DQO	mg O2/L	30,02	42,02	29%
Dureza	mg CaCO3/L	21,90	21,90	0%
pH	-	7,29	7,36	1%
Turbidez	NTU	0,21	0,22	4%
Alcalinidade	mg/L	42,25	37,84	12%
Alumínio	mg/L	0,03	0,03	5%
Amônia	mg/L	1,06	0,95	12%
Bário	mg/L	0,03	0,04	16%
Bicarbonato	mg/L	107,19	107,03	0%
Cálcio	mg/L	3,96	4,84	18%
Cloretos	mg/L	72,95	77,54	6%
Magnésio	mg/L	0,62	0,62	0%
Manganês	mg/L	0,01	0,02	42%
Sódio	mg/L	69,16	69,16	0%
Sulfato	mg/L	23,23	20,85	11%
Média				15%

Percebe-se em um primeiro momento que há em alguns parâmetros alguns desvios (definido como  $\varepsilon = \frac{|C_{real} - C_{sim}|}{C_{real}}$ ) significativos entre os resultados obtidos via simulação e os resultados históricos médios das análises. Porém, a diferença percentual média entre os resultados resta aceitável em 15%.

Alguns dos desvios podem ser explicados por fatores relacionados aos dados analíticos que geraram o modelo. É o caso dos Sólidos Dissolvidos Totais, da Sílica e da Demanda Química de Oxigênio: na saída dos Biodiscos e no Actflo® as análises são feitas pela REGAP; porém, na saída da filtração em Carvão e na EDR, as análises são realizadas pelo CENPES. Os dois laboratórios encontram, na média histórica, valores muito distintos, que geram uma descontinuidade no modelo e enviesam o resultado.

Outras diferenças significativas, como a do Ferro e do Manganês são simplesmente devidas ao fato de as concentrações finais serem extremamente baixas. Se desconsiderarmos esses cinco parâmetros, a diferença de resultados cai para 7% entre a simulação e as análises.

Pode-se proceder à consistência do modelo foi testada para um caso menos favorável e um caso mais favorável. Por caso menos favorável (Tabela 16), entende-se a simulação com valores de entrada iguais à média histórica acrescidas do desvio-padrão histórico e comparação do resultado da simulação com os valores históricos médios de saída acrescidos também do desvio-padrão histórico ( $C_i = \bar{C}_i + \sigma_i$ ). No caso mais favorável (Tabela 17), um procedimento análogo é adotado, com a redução de um valor igual aos desvios-padrão históricos dos valores históricos de entrada e saída ( $C_i = \bar{C}_i - \sigma_i$ )<sup>3</sup>.

Tabela 16. Comparação Simulação x Real - caso Menos Favorável  
Fonte: Elaboração própria

PARÂMETROS		Dessalinizado				Dessalinizado							
Bruto													
Parâmetro	Unid.	Simulação	Parâmetro	Unid.	Simulação	Lim. Perm.	OK?	Parâmetro	Unid.	Simulação	Real	Diferença	
COT	mg/L	31,90	COT	mg/L	14,68	-	N/A	COT	mg/L	14,68	13,98	5%	
Ferro	mg/L	1,23	Ferro	mg/L	0,00	0,10	N/A	Ferro	mg/L	0,00	0,04	100%	
O&G	mg/L	8,43	O&G	mg/L	2,05	-	N/A	O&G	mg/L	2,05	2,93	30%	
SDT	mg/L	848,37	SDT	mg/L	115,49	100,00	⊗	SDT	mg/L	115,49	233,00	50%	
Sílica	mg/L	15,14	Sílica	mg/L	12,35	10,00	⊗	Sílica	mg/L	12,35	21,17	42%	
SST	mg/L	48,61	SST	mg/L	9,24	20,00	⊗	SST	mg/L	9,24	16,36	44%	
Condutividade	μS/cm	1854,16	Condutividade	μS/cm	471,04	600,00	⊗	Condutividade	μS/cm	471,04	474,22	1%	
DBO	mg O2/L	84,68	DBO	mg O2/L	14,73	5,00	⊗	DBO	mg O2/L	14,73	24,55	40%	
DQO	mg O2/L	128,81	DQO	mg O2/L	36,90	15,00	⊗	DQO	mg O2/L	36,90	61,21	40%	
Dureza	mg CaCO3/L	201,81	Dureza	mg CaCO3/L	25,72	80,00	⊗	Dureza	mg CaCO3/L	25,72	44,44	42%	
pH	-	7,55	pH	-	7,52	6,9 - 8,5	N/A	pH	-	7,52	7,84	4%	
Turbidez	NTU	19,13	Turbidez	NTU	0,24	4,00	⊗	Turbidez	NTU	0,24	0,48	50%	
Alcalinidade	mg/L	120,76	Alcalinidade	mg/L	68,86	70,00	⊗	Alcalinidade	mg/L	68,86	61,46	12%	
Alumínio	mg/L	0,090	Alumínio	mg/L	0,06	0,020	⊗	Alumínio	mg/L	0,06	0,07	9%	
Amônia	mg/L	6,43	Amônia	mg/L	1,28	0,20	⊗	Amônia	mg/L	1,28	2,52	49%	
Bário	mg/L	0,36	Bário	mg/L	0,05	-	N/A	Bário	mg/L	0,05	0,07	33%	
Bicarbonato	mg/L	245,72	Bicarbonato	mg/L	103,24	-	N/A	Bicarbonato	mg/L	103,24	120,39	14%	
Cálcio	mg/L	62,78	Cálcio	mg/L	4,53	10,00	⊗	Cálcio	mg/L	4,53	7,06	36%	
Cloretos	mg/L	425,46	Cloretos	mg/L	89,09	100,00	⊗	Cloretos	mg/L	89,09	120,69	26%	
Magnésio	mg/L	8,50	Magnésio	mg/L	0,81	0,10	⊗	Magnésio	mg/L	0,81	0,90	10%	
Manganês	mg/L	0,12	Manganês	mg/L	0,01	0,10	⊗	Manganês	mg/L	0,01	0,04	89%	
Sódio	mg/L	300,12	Sódio	mg/L	81,16	-	N/A	Sódio	mg/L	81,16	92,65	12%	
Sulfato	mg/L	115,48	Sulfato	mg/L	27,64	40,00	⊗	Sulfato	mg/L	27,64	43,83	37%	
Não Conf.											7	Média	34%

Tabela 17. Comparação Simulação x Real - caso Mais Favorável  
Fonte: Elaboração própria

PARÂMETROS		Dessalinizado				Dessalinizado							
Bruto													
Parâmetro	Unid.	Simulação	Parâmetro	Unid.	Simulação	Lim. Perm.	OK?	Parâmetro	Unid.	Simulação	Real	Diferença	
COT	mg/L	10,26	COT	mg/L	6,63	-	N/A	COT	mg/L	6,63	9,70	32%	
Ferro	mg/L	0,43	Ferro	mg/L	0,02	0,10	⊗	Ferro	mg/L	0,02	-	-	
O&G	mg/L	0,33	O&G	mg/L	0,35	-	N/A	O&G	mg/L	0,35	0,93	62%	
SDT	mg/L	281,97	SDT	mg/L	25,87	100,00	⊗	SDT	mg/L	25,87	121,92	79%	
Sílica	mg/L	5,74	Sílica	mg/L	4,01	10,00	⊗	Sílica	mg/L	4,01	13,05	69%	
SST	mg/L	0,00	SST	mg/L	0,00	20,00	⊗	SST	mg/L	0,00	1,78	100%	
Condutividade	μS/cm	1077,72	Condutividade	μS/cm	189,98	600,00	⊗	Condutividade	μS/cm	189,98	253,46	25%	
DBO	mg O2/L	42,46	DBO	mg O2/L	8,41	5,00	⊗	DBO	mg O2/L	8,41	-	-	
DQO	mg O2/L	49,37	DQO	mg O2/L	19,13	15,00	⊗	DQO	mg O2/L	19,13	22,83	16%	
Dureza	mg CaCO3/L	141,83	Dureza	mg CaCO3/L	18,08	80,00	⊗	Dureza	mg CaCO3/L	18,08	-	-	
pH	-	7,09	pH	-	7,06	6,9 - 8,5	N/A	pH	-	7,06	6,88	3%	
Turbidez	NTU	9,43	Turbidez	NTU	0,17	4,00	⊗	Turbidez	NTU	0,17	-	-	
Alcalinidade	mg/L	46,02	Alcalinidade	mg/L	20,39	70,00	⊗	Alcalinidade	mg/L	20,39	14,22	43%	
Alumínio	mg/L	0,000	Alumínio	mg/L	0,00	0,020	⊗	Alumínio	mg/L	0,00	-	-	
Amônia	mg/L	0,17	Amônia	mg/L	0,15	0,20	⊗	Amônia	mg/L	0,15	-	-	
Bário	mg/L	0,16	Bário	mg/L	0,02	-	N/A	Bário	mg/L	0,02	0,01	108%	
Bicarbonato	mg/L	186,98	Bicarbonato	mg/L	108,78	-	N/A	Bicarbonato	mg/L	108,78	93,67	16%	
Cálcio	mg/L	46,98	Cálcio	mg/L	3,39	10,00	⊗	Cálcio	mg/L	3,39	2,62	29%	
Cloretos	mg/L	271,30	Cloretos	mg/L	56,81	100,00	⊗	Cloretos	mg/L	56,81	34,39	65%	
Magnésio	mg/L	4,48	Magnésio	mg/L	0,43	0,10	⊗	Magnésio	mg/L	0,43	0,33	28%	
Manganês	mg/L	0,02	Manganês	mg/L	0,01	0,10	⊗	Manganês	mg/L	0,01	-	-	
Sódio	mg/L	211,36	Sódio	mg/L	57,16	-	N/A	Sódio	mg/L	57,16	45,67	25%	
Sulfato	mg/L	78,58	Sulfato	mg/L	18,81	40,00	⊗	Sulfato	mg/L	18,81	-	-	
Não Conf.											3	Média	47%

<sup>3</sup> Quando  $C_i = \bar{C}_i - \sigma_i < 0$ , adota-se  $C_i = 10^{-4}$  para permitir cálculos.

O modelo é a princípio condizente, pois o número de não conformidades com os limites recomendados para reposição no sistema de resfriamento aumenta no caso menos favorável (7 possíveis não conformidades) e diminui no caso mais favorável (3 possíveis não conformidades).

Nota-se que o desvio médio aumentou nos dois casos (34% para o caso menos favorável e 47% para o caso mais favorável) e embora o desvio seja causado em parte por substâncias de concentrações muito baixas na saída (Ferro, Manganês, Bário), pode-se deduzir que há inconsistências que aparecem quando o modelo é testado próximo aos seus limites.

Os limites do modelo podem ser entendidos como valores de entrada não usuais (acréscimo ou decréscimo do desvio-padrão). No caso mais favorável, a diferença é maior (47%) e uma explicação plausível é o desvio-padrão tornar às vezes o valor de entrada muito baixo, comprometendo os cálculos posteriores.

O mesmo ocorre em menor grau no caso menos favorável (diferença de 34%), o que pode indicar que o modelo se comporta melhor com valores de entrada altos, uma característica positiva já que estes são os casos mais críticos para determinar a adequação do efluente tratado ao reúso.

### 2.3. Obtenção de Valores Limites de Entrada via Simulação

A partir do modelo estudado, pode-se, por tentativas determinar os valores de entrada dos parâmetros (valores medidos na saída dos Biodiscos) que atenderiam, ao final do processo de tratamento, o valor limite imposto.

Além dos 17 parâmetros há limite de concentração de saída para entrada no sistema de resfriamento, outros sete<sup>4</sup> que têm limite de concentração para entrada na EDR (dentre os 7, apenas 2 não tem limite também na saída da EDR: a concentração em COT e a concentração em O&G). No total, podem ser buscados os valores recomendados de entrada para 19 parâmetros.

Ao se executar o programa (Tabela 18), porém, não se consegue atingir este valor para 3 parâmetros: Ferro, Turbidez e SST. No caso destes parâmetros, ao se entrar valores muito acima dos valores médios, o modelo não responde corretamente e a remoção acaba sendo de 100% em alguma etapa (o que pode ocorrer quando a função de remoção cresce com a concentração de entrada).

Para os outros 16 parâmetros, é possível determinar os valores de entrada cujos resultados pós-simulação atingem os limites impostos para entrada na EDR ou para reposição no Sistema de Resfriamento.

---

<sup>4</sup> Controle de entrada na EDR para: COT: 15,00 mg/L ; Ferro: 0,30 mg/L ; O&G: 2,00 mg/L ; DQO: 50,00 mg/L ; Turbidez: 0,50 NTU ; Alumínio: 0,10 mg/L ; Manganês: 0,10 mg/L.

Tabela 18. Valores de Entrada no sistema para atendimento aos Limites

Fonte: Elaboração própria

PARÂMETROS		Adsorvido				Dessalinizado		
Bruto		Simulação	Simulação	Limite	OK?	Simulação	Lim. Ajust.	OK?
Parâmetro	Unid.							
COT	mg/L	25,00	14,6	15,00	✓	11,6	-	N/A
Ferro	mg/L	1,50	0,00	0,30	N/A	0,00	0,10	N/A
O&G	mg/L	8,00	1,9	2,00	✓	2,0	-	N/A
SDT	mg/L	745,00	510,47	-	N/A	99,4	100,00	✓
Sílica	mg/L	12,50	9,26	-	N/A	9,9	10,00	✓
SST	mg/L	156,00	0,00	-	N/A	0,0	20,00	N/A
Condutividade	µS/cm	2145,00	2293,02	-	N/A	598,0	600,00	✓
DBO	mg O2/L	22,50	10,42	-	N/A	4,9	5,00	✓
DQO	mg O2/L	36,00	14,56	50,00	✓	14,6	15,00	✓
Dureza	mg CaCO3/L	625,00	619,43	-	N/A	79,7	80,00	✓
Turbidez	NTU	146,00	0,00	0,50	N/A	0,0	4,00	N/A
Alcalinidade	mg/L	122,00	122,00	-	N/A	69,8	70,00	✓
Alumínio	mg/L	0,028	0,03	0,10	✓	0,0	0,02	✓
Amônia	mg/L	0,25	0,25	-	N/A	0,2	0,20	✓
Cálcio	mg/L	137,50	137,50	-	N/A	9,9	10,00	✓
Cloretos	mg/L	475,00	475,00	-	N/A	99,5	100,00	✓
Magnésio	mg/L	1,00	1,00	-	N/A	0,10	0,10	✓
Manganês	mg/L	0,09	0,09	0,10	✓	0,01	0,10	✓
Sulfato	mg/L	165,00	165,00	-	N/A	39,5	40,00	✓
Não Conf.								0

A Tabela 19 apresenta uma comparação entre os limites de entrada recomendados (encontrados através do método de tentativas) e os valores históricos médios de entrada no sistema, indicando a margem de segurança em relação a cada um dos parâmetros. Valores positivos da margem significam que, na média, os valores de entrada históricos são inferiores aos limites encontrados. Valores negativos significam que os valores recomendados são inferiores aos valores históricos e que o reúso tal qual pode gerar problemas futuros no sistema de resfriamento.

Tabela 19. Margem de Segurança do Tratamento

Fonte: Elaboração própria

PARÂMETROS		Limites	Média	Margem
Bruto		Encontrados	Histórica	Segurança
Parâmetro	Unid.			
COT	mg/L	25,00	21,08	19%
O&G	mg/L	8,00	4,38	83%
SDT	mg/L	745,00	565,17	32%
Sílica	mg/L	12,50	10,44	20%
Condutividade	µS/cm	2145,00	1465,94	46%
DBO	mg O2/L	22,50	63,57	-65%
DQO	mg O2/L	36,00	89,09	-60%
Dureza	mg CaCO3/L	625,00	171,82	264%
Alcalinidade	mg/L	122,00	83,39	46%
Alumínio	mg/L	0,028	0,040	-30%
Amônia	mg/L	0,25	3,30	-92%
Cálcio	mg/L	137,50	54,88	151%
Cloretos	mg/L	475,00	348,38	36%
Magnésio	mg/L	1,00	6,49	-85%
Manganês	mg/L	0,09	0,07	29%
Sulfato	mg/L	165,00	97,03	70%

Algumas conclusões podem ser aferidas em relação às margens de segurança apresentadas. Os valores de entrada atuais que não condizem com os limites recomendados por esse trabalho são cinco: DBO, DQO, Amônia, Magnésio e Alumínio.

A alta concentração de DQO e DBO é característica do efluente petroquímico, mesmo após passagem por tratamento primário e secundário e revela teor elevado de matéria orgânica no efluente. Em conjunto com a Amônia, pode levar a formação de *biofouling* nas superfícies do sistema de trocador de calor, problema já enunciado anteriormente. O sistema terciário, tal como proposto, apesar de remover parte da concentração inicial, não atende os limites finais impostos. A fim de poder atingi-los, seria necessário repensar a possibilidade de gerar cloraminas e avaliar seu efeito corrosivo em materiais metálicos.

Em relação ao Magnésio, apesar de alto em relação ao limite encontrado, já foi apontado que esta substância por si só não é prejudicial no sentido de formar incrustações, visto que a Dureza total do efluente de entrada é baixa (margem de segurança mais elevada).

Por último, em relação aos outros parâmetros, nota-se uma margem de segurança satisfatória, da ordem de 42% (se retirada a Dureza e o Cálcio para dar maior representatividade). Assim, a única fraqueza aparente do sistema de reúso já operante é a possibilidade de formação de *biofouling*, respondendo adequadamente às outras funções desejadas (remoção do caráter corrosivo e da dureza).

## V. CONCLUSÃO E SUGESTÕES

---

Este trabalho se dispôs a modelar cada um dos equipamentos do sistema e simular seu comportamento a partir de dados de entrada. O modelo proposto mostrou-se congruente com o comportamento real do sistema, embora apresente certas limitações e seja possível aprimorá-lo para que ele responda bem a situações mais próximas dos limites de entrada no sistema.

Através da simulação com valores de entrada equivalentes aos valores históricos médios de qualidade do efluente da Refinaria Gabriel Passos foi possível analisar a adequação do tratamento terciário ao reúso como água de reposição no sistema de resfriamento – objetivo deste trabalho.

Notou-se que, para a maioria dos parâmetros analisados, há atendimento aos limites impostos. As substâncias em suspensão são efetivamente removidas, baixando-se consideravelmente a turbidez. A dureza e a concentração de metais na água tratada são baixas, o que indica fraco potencial de formação de incrustações ou depósitos. Em geral, a concentração de íons é também baixa (refletida na condutividade reduzida), evitando ambiente corrosivo no sistema da torre de resfriamento. A função geral do tratamento terciário é assim desempenhada: abrandamento da concentração de substâncias suspensas e dissolvidas para adequação ao reúso. Porém, resta ainda certo potencial de formação de *biofouling*, pois a DQO, a DBO e a concentração de Amônia ultrapassam os limites recomendados.

O tratamento terciário não é muito efetivo na remoção de Sílica, pois esta substância não é removida na EDR, por ser apolar, ou nas outras etapas do tratamento; nem na de Alumínio, provavelmente porque o coagulante injetado (PAC) aumenta a concentração deste íon. Caso a concentração do efluente do tratamento secundário aumente para estas substâncias, pode ser necessário adaptar a operação, com o câmbio do coagulante, inclusive para um que efetive a remoção de sílica.

Foi possível determinar, através do modelo, os valores de entrada dos diferentes parâmetros que corresponderiam, na saída do tratamento, aos limites recomendados para reposição no sistema de resfriamento. Dentre os 16 parâmetros analisados, 11 têm concentração histórica média de entrada menor do que o valor limite encontrado, estando dentro de uma margem de segurança de operação.

Há três parâmetros que estão fora da margem de segurança e que são relacionados: a DQO, a DBO e a concentração de Amônia. O tratamento terciário, apesar de ser efetivo em sua remoção, não obtida os limites de saída recomendados. Talvez seja necessário adicionar uma etapa – tratamento em lodo ativado – ao final do tratamento secundário que complemente sua remoção biológica. Os outros dois parâmetros fora da margem de segurança são o Magnésio e o Alumínio. O Magnésio por si só não tem capacidade de formar incrustações, dada a baixa dureza da água tratada. O coagulante utilizado deve, como foi dito, ser repensado, caso haja formação de depósitos decorrentes da concentração de Alumínio.

O modelo apresentado por este trabalho peca em alguns pontos, que podem diminuir parcialmente sua credibilidade: ele é baseado em funções que relacionam a remoção de certa substância ou a diminuição de um determinado parâmetro em função apenas da sua concentração de entrada. Ora, sabe-se que a remoção não é função exclusiva de uma variável, mas de diversas – como a vazão, a rotação dos agitadores, a saturação dos leitos, a voltagem aplicada e a própria concentração das outras substâncias – e que tal função não é determinística, mas probabilística.

A fim de se chegar a um modelo mais sólido, é necessária uma maior quantidade de dados, que poderia ser atingida através de um sistema de monitoramento online, que armazenasse além do resultado das análises, as diversas variáveis de operação no momento de amostragem. No entanto, este projeto mostrou que o modelo de um processo, se bem sólido e empregado, pode ser um grande aliado na sua operação, possibilitando, através de sua análise, prever sua adequação ao objetivo proposto.

Trabalhos futuros podem se concentrar em diferentes direções: determinação de um modelo mais consistente para este tratamento; análise de variações em sua configuração, como a inserção de ciclos de retroalimentação; ou ainda validação deste tipo de abordagem metodológica para outro tratamento de águas (industrial ou não).

## VI. BIBLIOGRAFIA

---

- BARBOSA, F. L. (2007). *Regulamentação do Reúso da Água em Refinarias - Análise do Modelo Maericano e Perspectivas para o Cenário Nacional*. COPPE/UFRJ, PPE, Rio de Janeiro.
- BARTH, F. T. (1987). *Modelos para Gerenciamento de Recursos Hídricos*. São Paulo: Nobel.
- CENPES. (2009). *Descritivo da Unidade Protótipo de Eletrodialise Reversa - RT BTA 025-2009*.
- CENPES. (2009). *Descritivo do Filtro de Carvão Ativado da Unidade Protótipo de Reuso de Efluente da REGAP - RT BTA 020-2009*.
- CENPES. (2009). *Descritivo do Sistema de Remoção de Sólidos da Unidade Protótipo de Reúso de Efluente da REGAP - RT BTA 021-2009*.
- ECKENFELDER, W. W. (2000). *Industrial Water Pollution Control* (3rd Edition ed.). McGraw-Hill International Editions.
- FARIA, D. C. (2004). *Reúso das Correntes de Efluentes Aquosos em Refinarias de Petróleo*. UFSC, DEQEA, Florianópolis.
- GE Company. (07 de Abril de 2007). *Electrodialysis Treatment of Surface and Wastewaters - Technipal Paper*. Acesso em 12 de 03 de 2013, disponível em Water & Process Technologies: <http://www.gewater.com/>
- MACHADO, M. d. (2008). *Avaliação do Processo de Eletrodialise Reversa no Tratamento de Efluentes de Refinaria de Petróleo*. UFRGS, PPGEM, Porto Alegre.
- MANCUSO, P. C. (2001). *Reúso de Água para Torres de Resfriamento*. São Paulo.
- MANCUSO, P. C., & SANTOS, H. F. (2003). *Reúso de Água*. São Paulo: Manole.
- PERLINGEIRO, C. A. (2005). *Engenharia de Processos* (1ª Edição ed.). Blucher.
- PETROBRAS. (2004). Avaliação de tecnologias visando ao reúso de efluentes: Unidade-Piloto da Tecnologia Actiflo. *Efluentes Hídricos: Resultados em P&D*.
- PETROBRAS. (2006). Tratamento e Reuso de Efluentes Hídricos. *Workshop: Eficiência no Uso e Reuso da Água na Indústria. Tecnologias e Experiências*.
- PETROBRAS. (2009). *Apresentação REGAP*. Acesso em 20 de Janeiro de 2013, disponível em Ministério do Meio Ambiente: <http://www.mma.gov.br/>
- PETROBRAS. (2013). *Principais Operações*. Acesso em 20 de 01 de 2013, disponível em PETROBRAS: <http://www.petrobras.com.br/>
- RITCHER, C. A., & NETTO, J. M. (1991). *Tratamento de Água Tecnologia Atualizada*. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda.
- THURLER, G. M. (2012). *Modelagem e Simulação do Sistema PACT® para Tratamento de Efluentes de Refinaria*. UFRJ, EQ, Rio de Janeiro.
- TOUMA, S. L. (2013). *Testes Acelerados em Colunas de Pequena Escala: O uso de Carvão Ativado Granular em projetos de reúso de efluentes de Refinarias de Petróleo*. UFRJ, EQ/TPBQ, Rio de Janeiro.
- TROVATI, J. (2004). *Tratamento de Água de Resfriamento - Curso On-Line*. Araraquara, SP.
- UN-Water. (2012). *Statistics*. Acesso em 20 de Fevereiro de 2013, disponível em UN-Water: <http://www.unwater.org/statistics.html>
- US-EPA. (1992). *Guidelines for Water Reuse*. Washington, DC.
- Veolia Water Solutions. (2013). *Actiflo*. Acesso em 21 de Fevereiro de 2013, disponível em Veolia Water Solutions Website: <http://www.veoliawaterst.com/actiflo/>
- ZINKUS, G. A., & BYERS, W. D. (May de 1998). Identify Appropriate Water Reclamation Technologies. *Chemical Engineering Progress*.

## ANEXOS

### ANEXO 1:

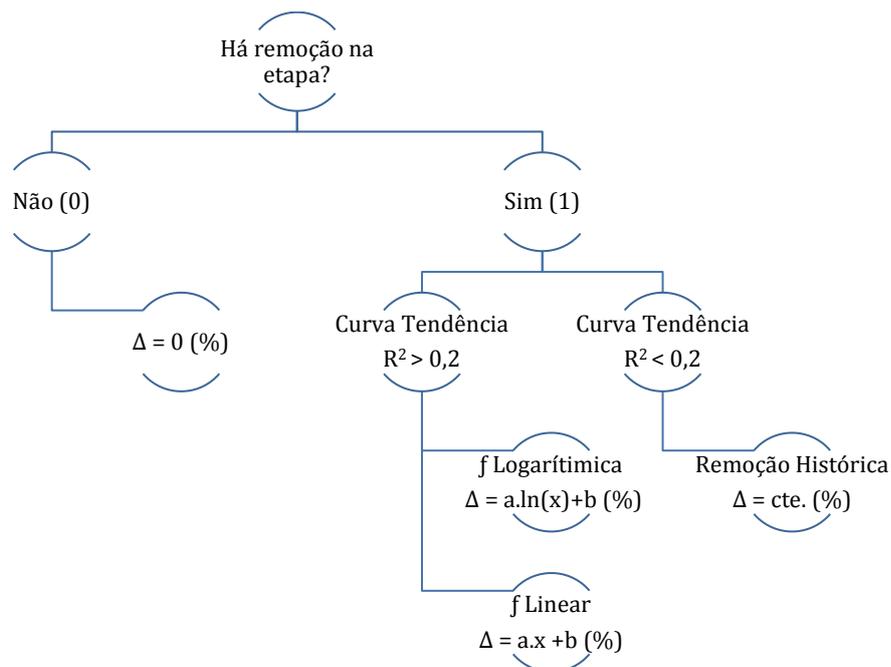
#### Funções de Remoção paramétrica em relação à Concentração de Entrada na Etapa:

Neste trabalho, as funções de remoção percentual de concentração ou de diminuição percentual de medida (ambas denotadas por  $\Delta$ ) foram determinadas empiricamente a partir da correlação entre Remoção/Diminuição Percentual e Concentração/Medida na Entrada da Etapa, levando-se em consideração os dados históricos disponíveis e através de regressão que mais se adaptava ao caso. Assim, a função de remoção / diminuição é:  $\Delta = f(C_{i \text{ na entrada}})$ . Por via de simplificação a função de diminuição é chamada também de função de remoção.

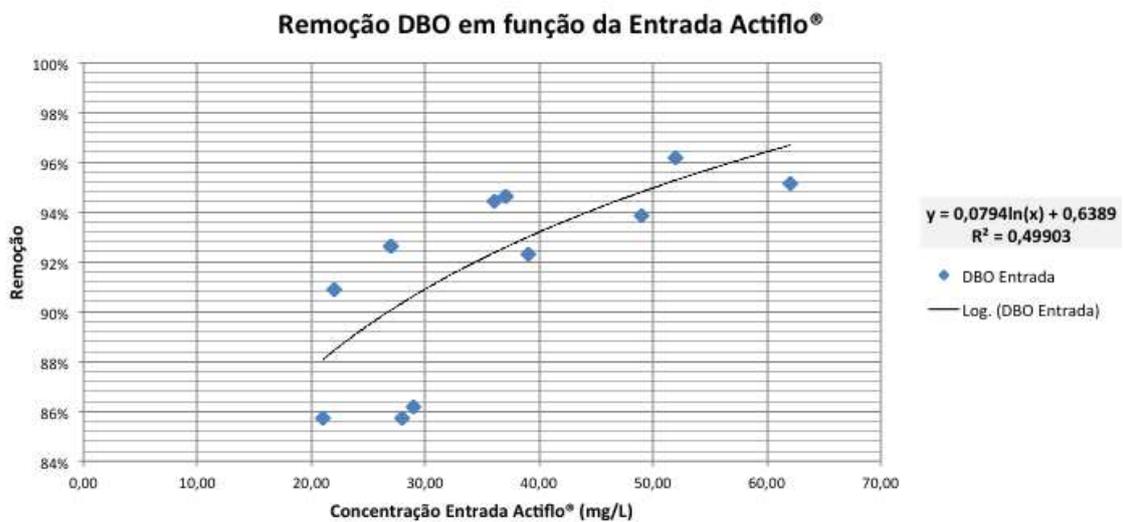
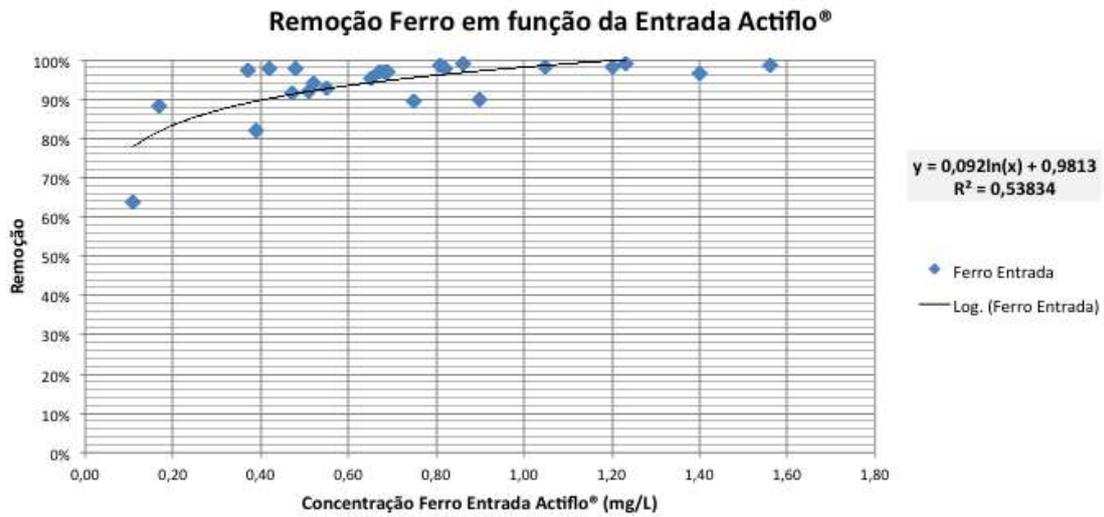
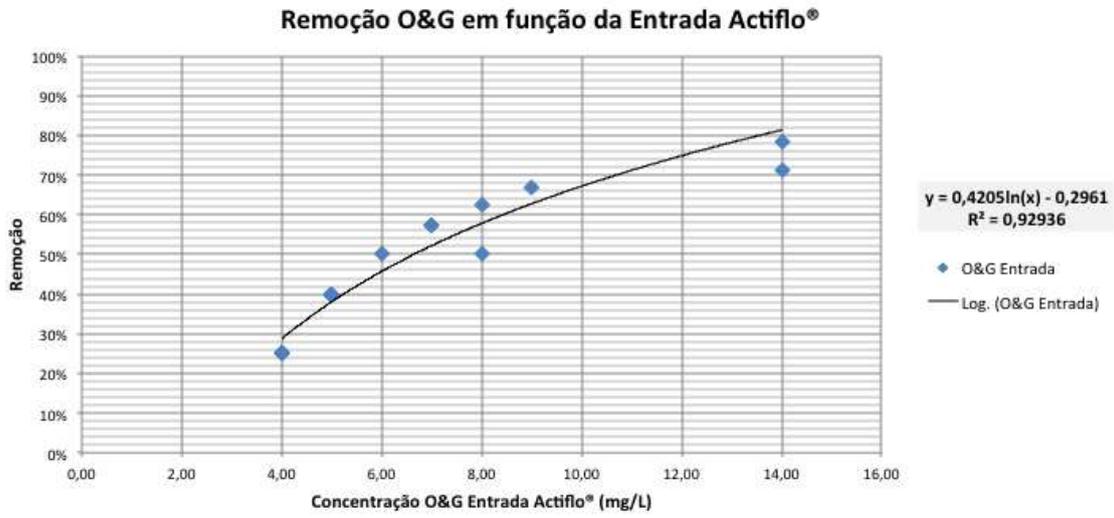
Na maioria das vezes, o tipo de regressão que mais condissse com o comportamento observado foi a regressão logarítmica. Uma explicação plausível está no fato de que a remoção é naturalmente fraca quando a concentração de entrada da substância é baixa, aumentando rapidamente e se estabilizando em seguida.

Quando o valor de  $R^2$  da linha de tendência era inferior a 0,2 foi utilizado como função de ligação entre Remoção Paramétrica e Concentração de Entrada o percentual de remoção histórico médio. Quando não havia dados disponíveis para análise entre Entrada-Saída concomitantemente, foi adotada remoção nula para a substância.

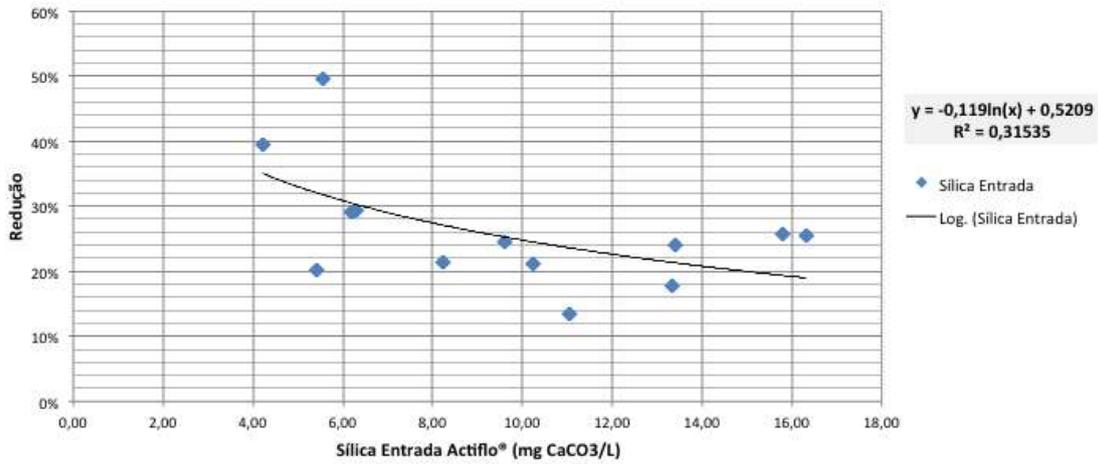
A seguir, podem ser encontrados os gráficos de “Remoção em função da Concentração de Entrada” para cada um dos parâmetros relevantes para a etapa, com suas respectivas funções ou constantes de remoção adotadas. O diagrama a seguir explica o caminho adotado pelo algoritmo do VBA para simular a remoção na etapa.



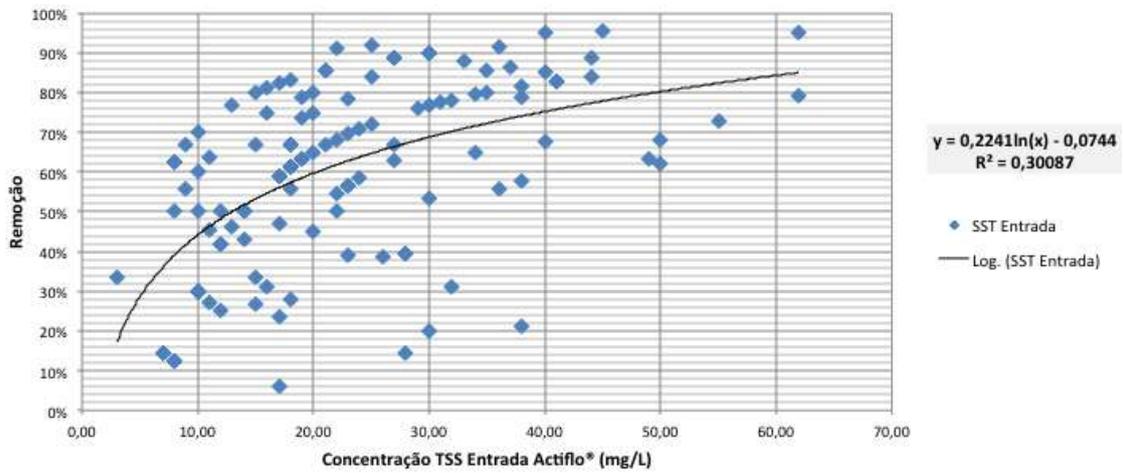
Actiflo + Filtro de Areia  
 Correlação Relevante:



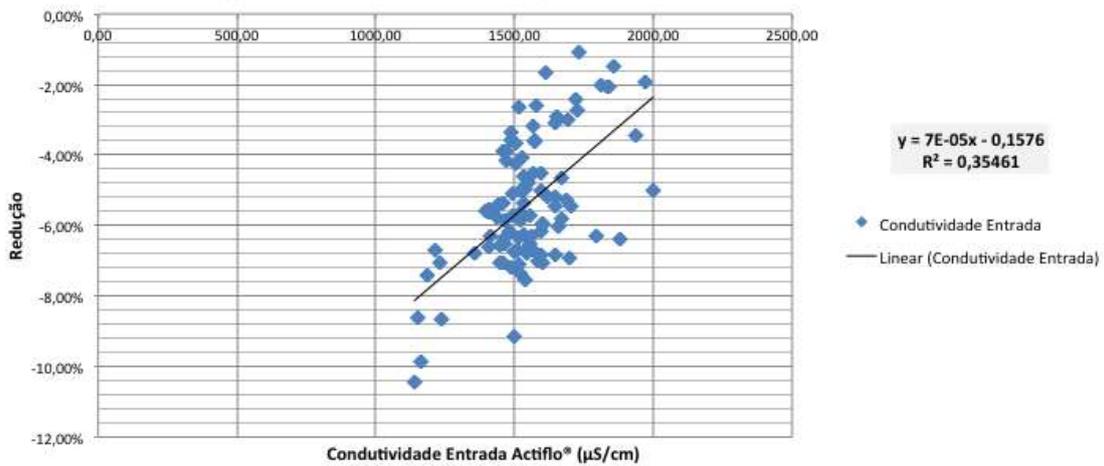
**Redução Sílica em função da Entrada Actiflo®**



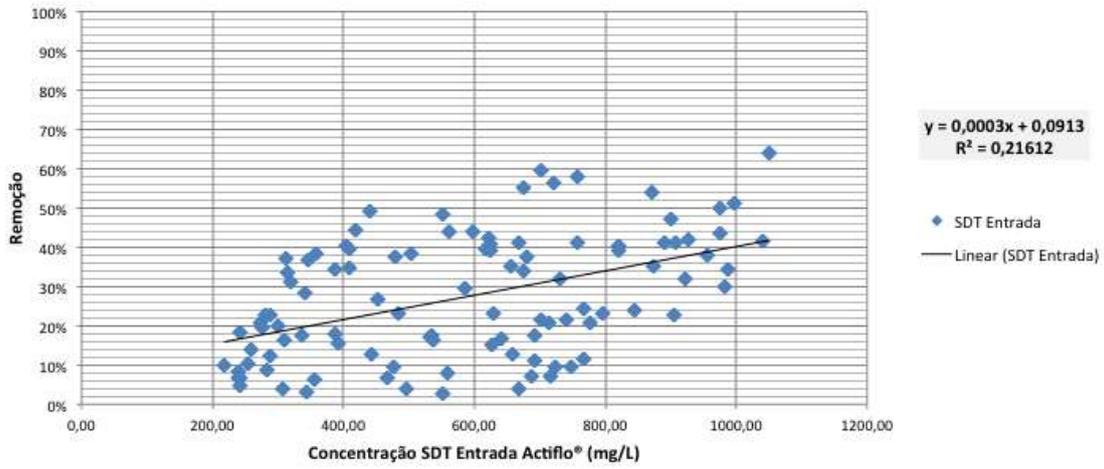
**Remoção SST em função da Entrada Actiflo®**



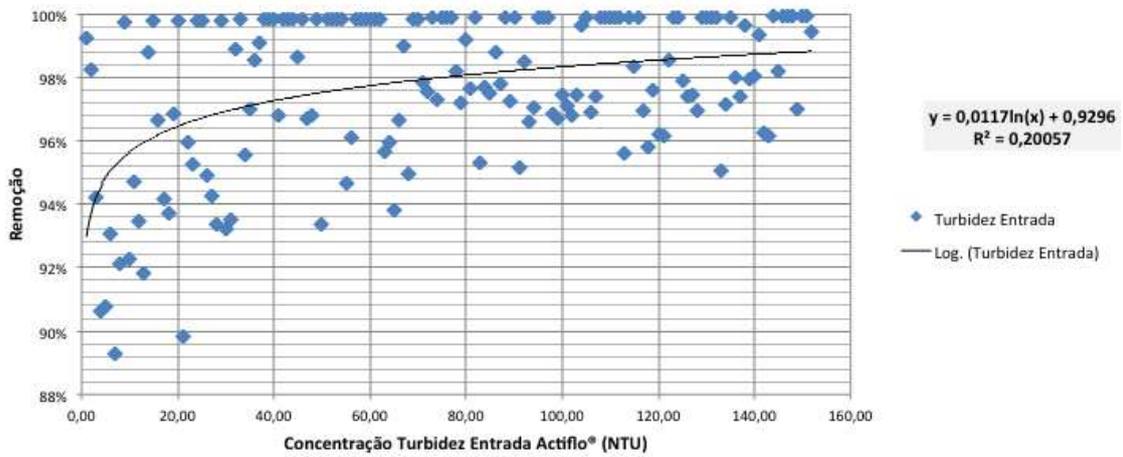
**Redução Condutividade em função da Entrada Actiflo®**



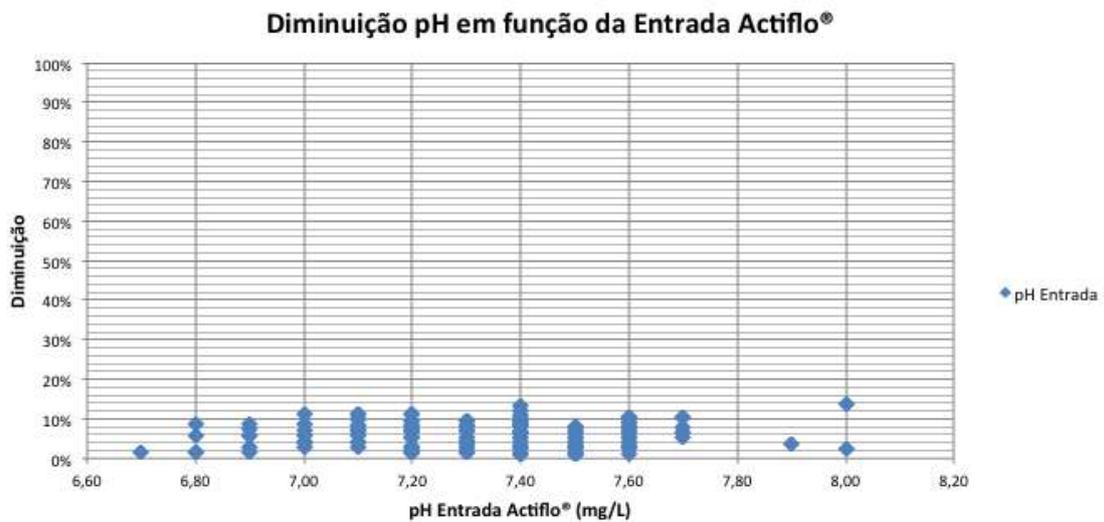
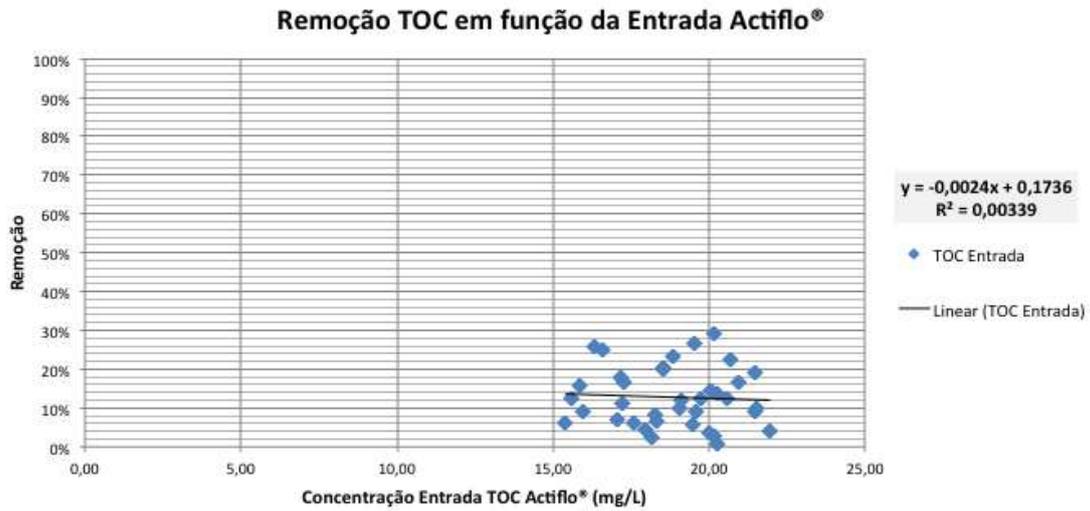
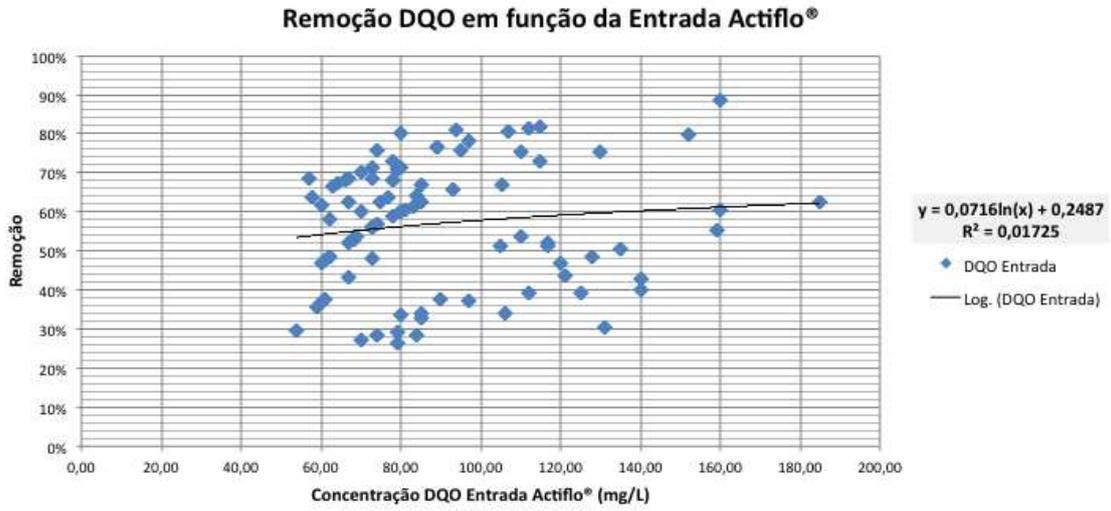
### Remoção SDT em função da Entrada Actiflo®



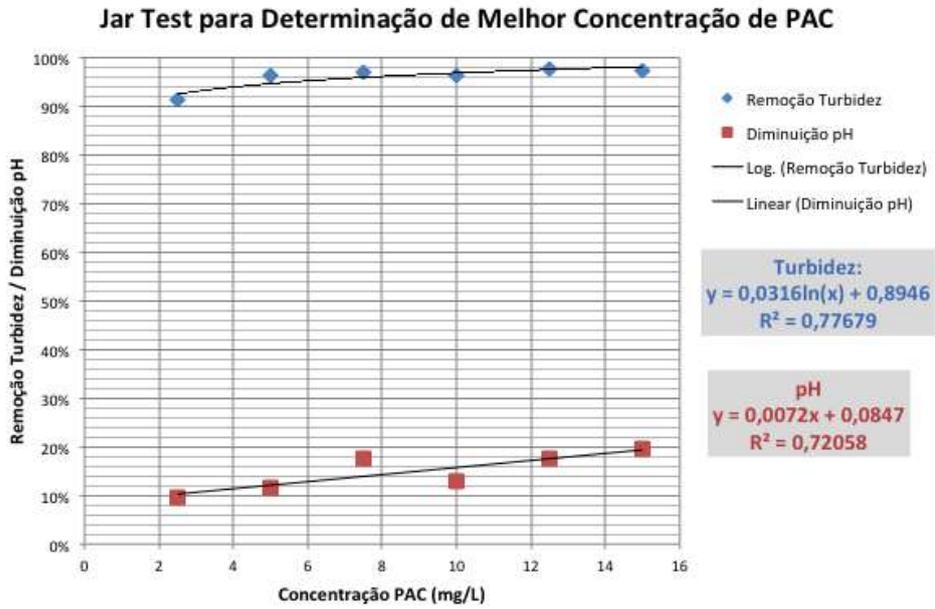
### Remoção Turbidez em função da Entrada Actiflo®



*Correlação Irrelevante:*



Jar Tests executados pelo Lab Tare para determinação de efeito da concentração de coagulante em Turbidez e pH:



*Dados empregados no Excel utilizados pelo Modelo VBA no caso do Actiflo + FA:*

A seguir, se encontram os dados que estão na Planilha “Aux” do Modelo desenvolvido em Excel. Para cada parâmetro em cada etapa, foram listadas: remoções históricas médias; se há remoção relevante ou não na etapa; qual o tipo de função de remoção quando existente, qual a sua correlação ( $R^2$ ) e quais os valores de suas constantes paramétricas ( $a$  e  $b$ ).

Há tabelas similares para cada uma das três etapas.

A tabela é lida pelo programa VBA desenvolvido e permite a simulação do tratamento para cada um dos parâmetros listados.

		Equip.	Actiflo+FA						
Parâmetro	Unid.	$\Delta$ médio	Há remoção?		Tipo Eq.	$R^2$	a	b	
COT	mg/L	21%	● 1		LIN	!	0,003		
Ferro	mg/L	96%	● 1		LOG	✓	0,538	0,092 0,9813	
O&G	mg/L	27%	● 1		LOG	✓	0,929	0,4205 -0,2961	
SDT	mg/L	18%	● 1		LIN	✓	0,216	0,0003 0,0913	
Sílica	mg/L	5%	● 1		LOG	✓	0,3135	-0,119 0,5209	
SST	mg/L	61%	● 1		LOG	✓	0,301	0,2241 -0,0744	
Condutividade	$\mu$ S/cm	-15%	● 1		LIN	✓	0,354	0,00007 -0,2576	
DBO	mg O2/L	66%	● 1		LOG	✓	0,499	0,0794 0,3389	
DQO	mg O2/L	54%	● 1		LOG	!	0,0173		
Dureza	mg CaCO3/L	7%	● 1		-				
pH	-	3%	● 1		-				
Turbidez	NTU	98%	● 1		LOG	✓	0,201	0,0117 0,9296	
Alcalinidade	mg/L	-	● 0						
Alumínio	mg/L	-	● 0						
Amônia	mg/L	-	● 0						
Bário	mg/L	-	● 0						
Bicarbonato	mg/L	-	● 0						
Cálcio	mg/L	-	● 0						
Cloretos	mg/L	-	● 0						
Magnésio	mg/L	-	● 0						
Manganês	mg/L	-	● 0						
Sódio	mg/L	-	● 0						
Sulfato	mg/L	-	● 0						

\* Calibragem para o parâmetro DBO:

Valor de  $b$  passado de 0,6389 para 0,3389 para melhor condizer com remoção real do sistema

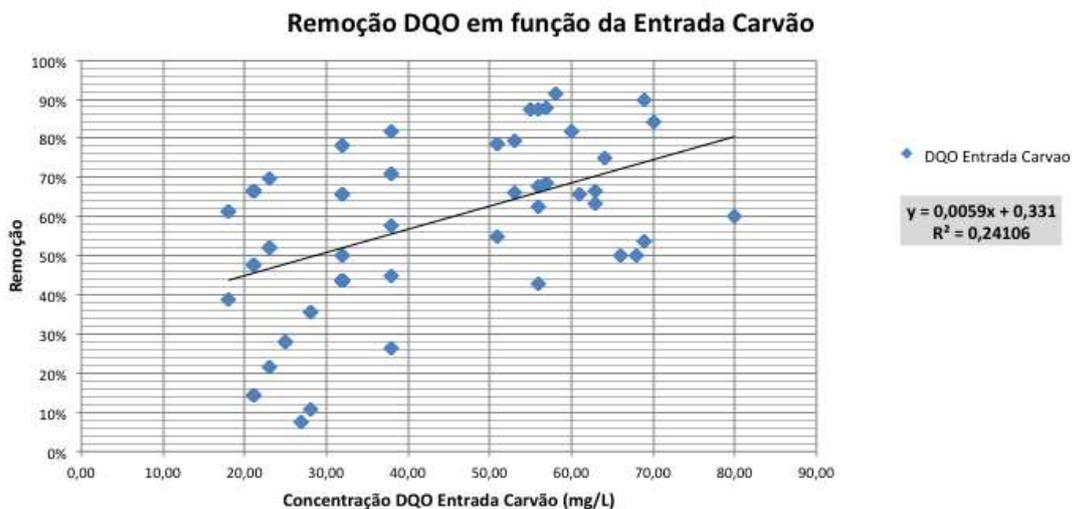
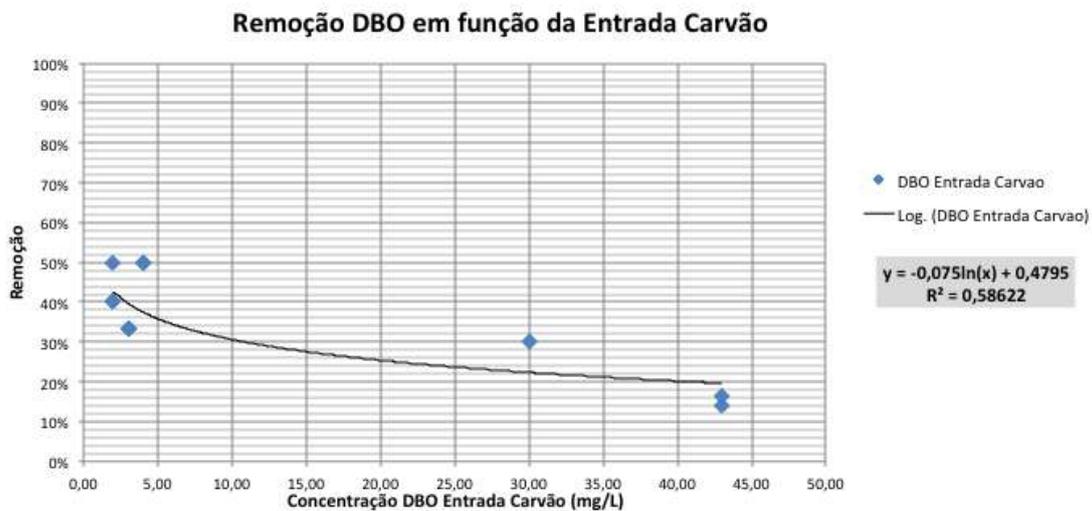
\* Calibragem para o parâmetro Condutividade:

Valor de  $b$  passado de -0,1576 para -0,2576 para melhor condizer com a remoção real do sistema

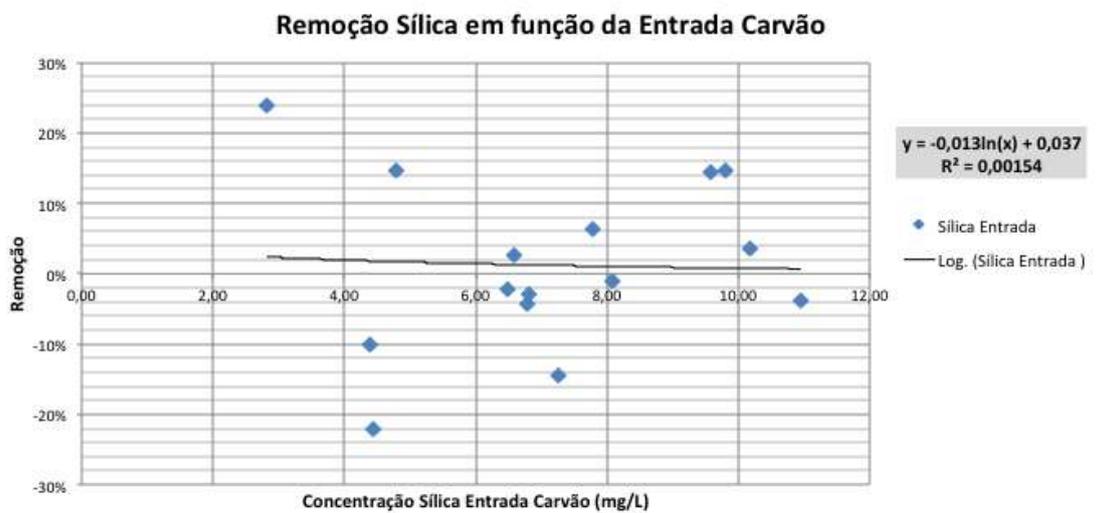
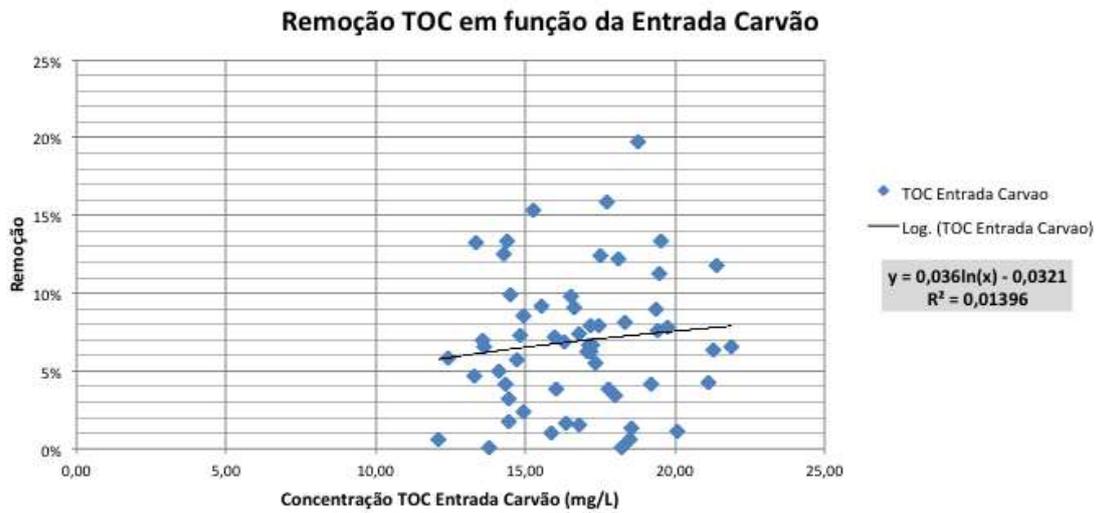
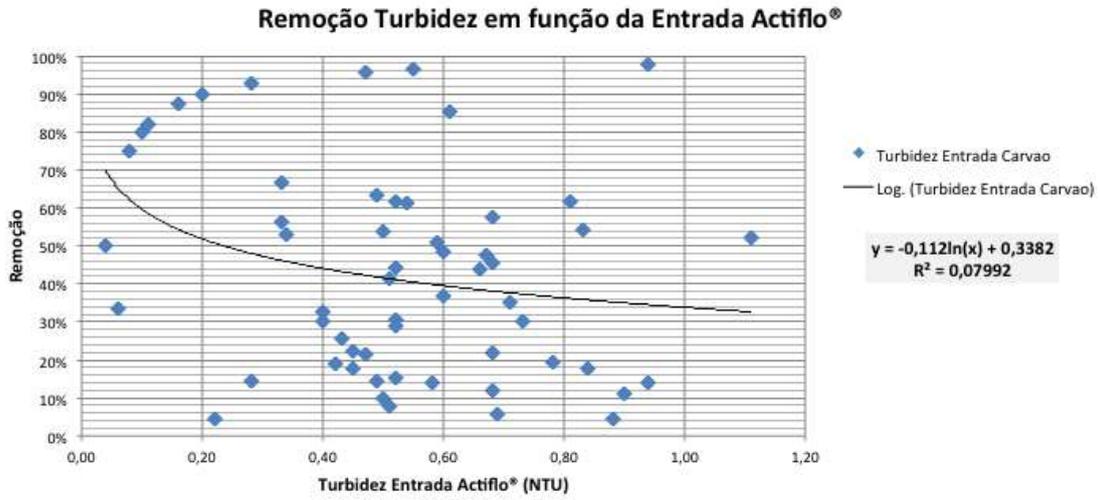
## Carvão Ativado Granular

Para esta etapa, foram considerados apenas os resultados analíticos realizados pela REGAP. A água foi analisada tanto na entrada quanto na saída da etapa, e pode-se traçar uma correlação entre as concentrações de entrada e saída. No caso do laboratório do CENPES, não há amostras realizadas na entrada da etapa do Filtro de Carvão e, por esse motivo, não é possível traçar a mesma correlação. Imposta essa restrição e considerando que não há muitos parâmetros analisados pela REGAP concomitantemente na entrada e na saída do carvão, há poucas funções de remoção passíveis de serem determinadas para essa etapa.

### *Correlação Relevante:*



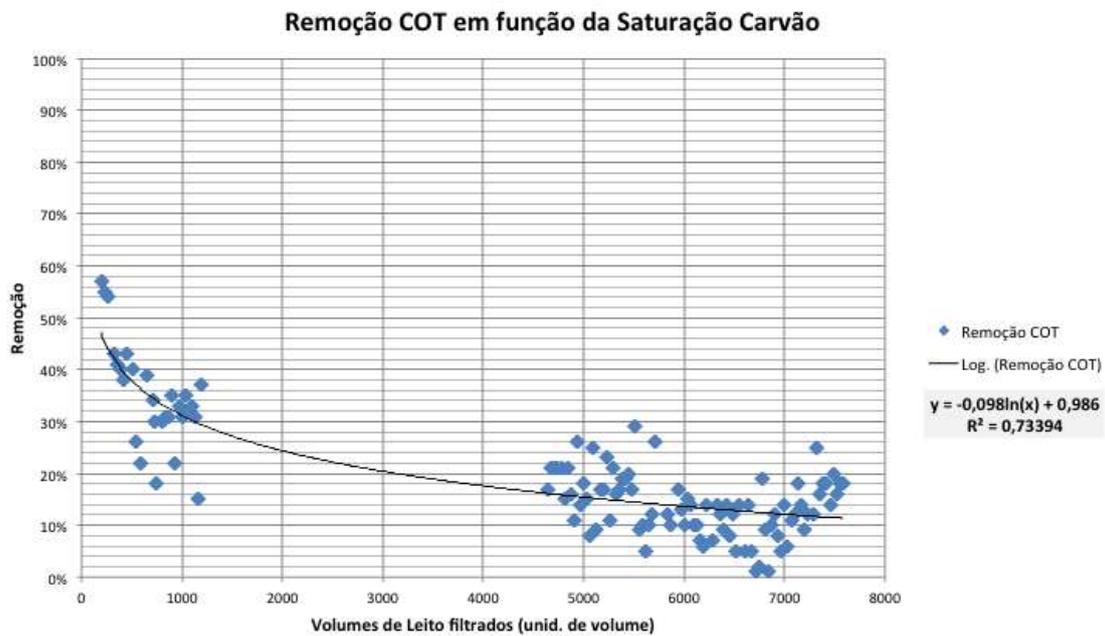
*Correlação Irrelevante:*



### Curva de Ruptura do CAG

A curva de remoção do TOC no filtro de CAG em função do volume de leitos filtrados foi construída a partir de dados operacionais obtidos por (TOUMA, 2013) na unidade de reúso da REGAP.

Pode-se notar que não há informação do comportamento da curva de ruptura da unidade protótipo no intervalo de 1200 a 4700 volumes de leitos processados, que corresponde ao período que a unidade operou sem a coleta e análise de amostras. A curva de ruptura apontou uma saturação precoce dos leitos, uma vez que em torno de 1000 volumes de leito processados já se tinha atingido cerca de 70% de saturação, com alguns pontos chegando a quase 100 %.



Dados empregados no Excel utilizados pelo Modelo VBA no caso do Carvão:

		Equip.	Carvão						
Parâmetro	Unid.	$\Delta$ médio	Há remoção?	Tipo Eq.	R2	a	b		
COT	mg/L	7%	● 1	LOG	⚠ 0,014	0,036	-0,0321		
Ferro	mg/L	-36%	● 0	*					
O&G	mg/L	45%	● 1	-					
SDT	mg/L	-	● 0						
Sílica	mg/L	5%	● 1	LOG	⚠ 0,002				
SST	mg/L	-	● 0						
Condutividade	$\mu$ S/cm	3%	● 1	-					
DBO	mg O2/L	-5%	● 1	LOG	✓ 0,586	-0,075	0,04795		
DQO	mg O2/L	34%	● 1	LIN	✓ 0,241	0,0059	0,03		
Dureza	mg CaCO3/L	-7%	● 1	-					
pH	-	-3%	● 1	-					
Turbidez	NTU	11%	● 1	LOG	⚠ 0,08	-0,112	0,3382		
Alcalinidade	mg/L	-	● 0						
Alumínio	mg/L	-	● 0						
Amônia	mg/L	-	● 0						
Bário	mg/L	-	● 0						
Bicarbonato	mg/L	-	● 0						
Cálcio	mg/L	-	● 0						
Cloretos	mg/L	-	● 0						
Magnésio	mg/L	-	● 0						
Manganês	mg/L	-	● 0						
Sódio	mg/L	-	● 0						
Sulfato	mg/L	-	● 0						

\* valores médios não representativos, pois demonstram acúmulo excessivo

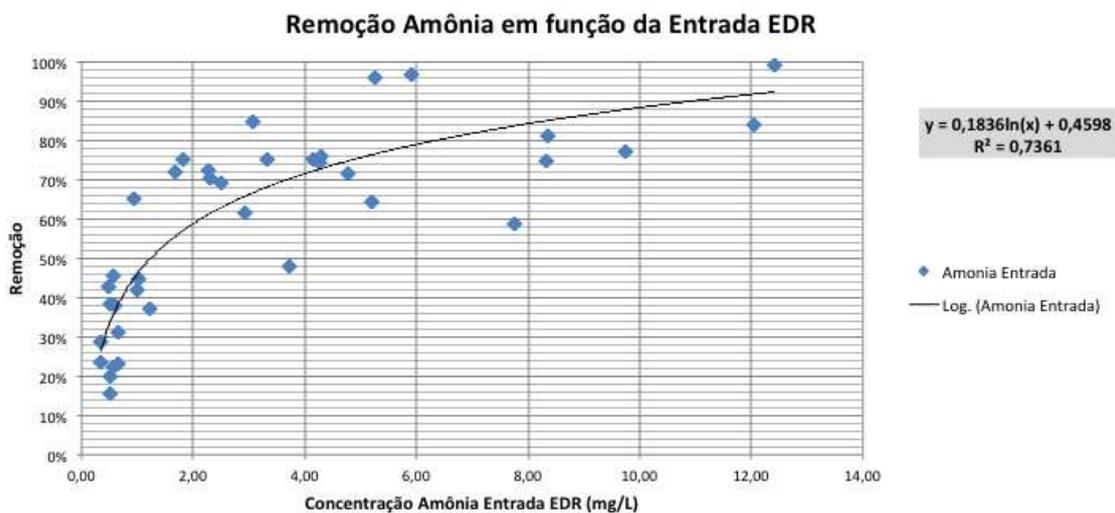
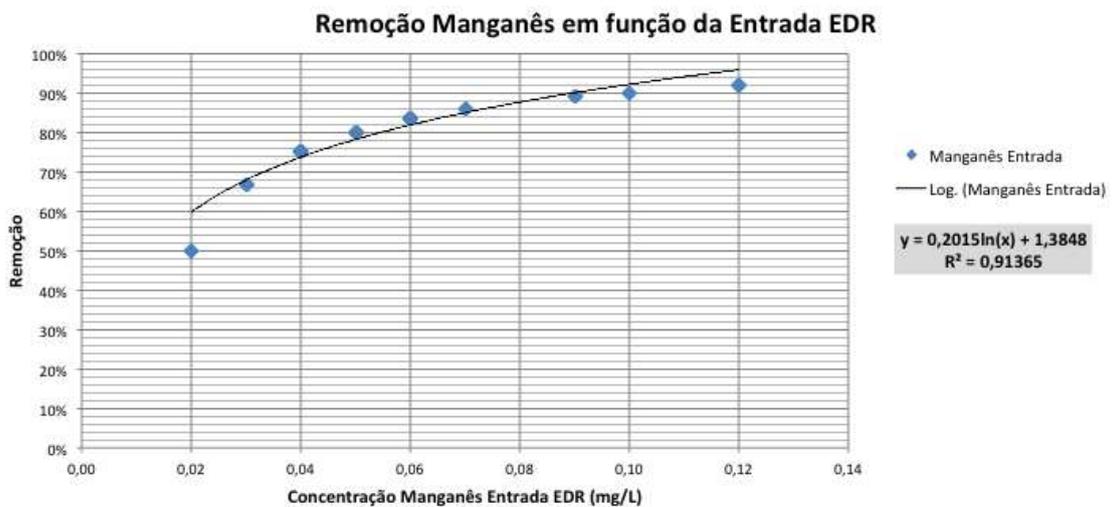
\* Calibragem para o parâmetro DQO:

Valor de  $b$  passado de 0,331 para 0,031 para melhor condizer com remoção real do sistema

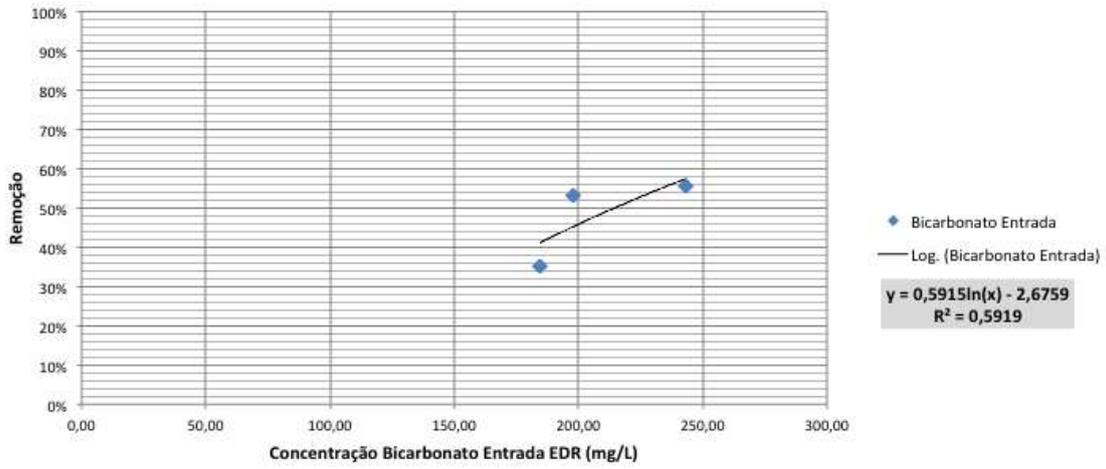
## Eletrodialise Reversa

Nesta etapa, foram considerados apenas os resultados analíticos realizados pelo CENPES. O Laboratório estudou mais precisamente o desempenho desta unidade, analisando periodicamente a água a montante e a jusante. No caso do laboratório da REGAP, há menos amostras realizadas concomitantemente na entrada e na saída da etapa de Eletrodialise, o que dificulta a definição das funções de remoção. Desse modo, as funções de remoção aqui definidas serão provenientes dos resultados do CENPES.

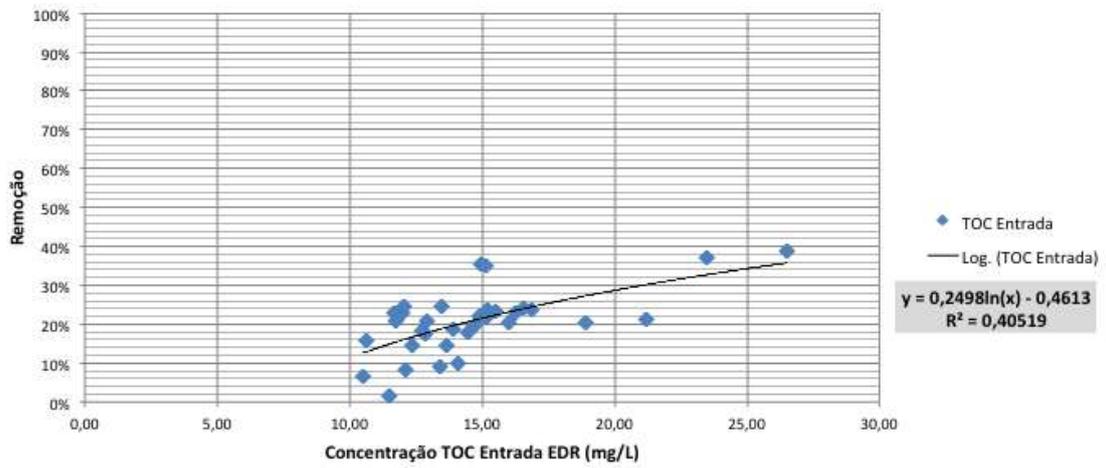
### *Correlação Relevante:*



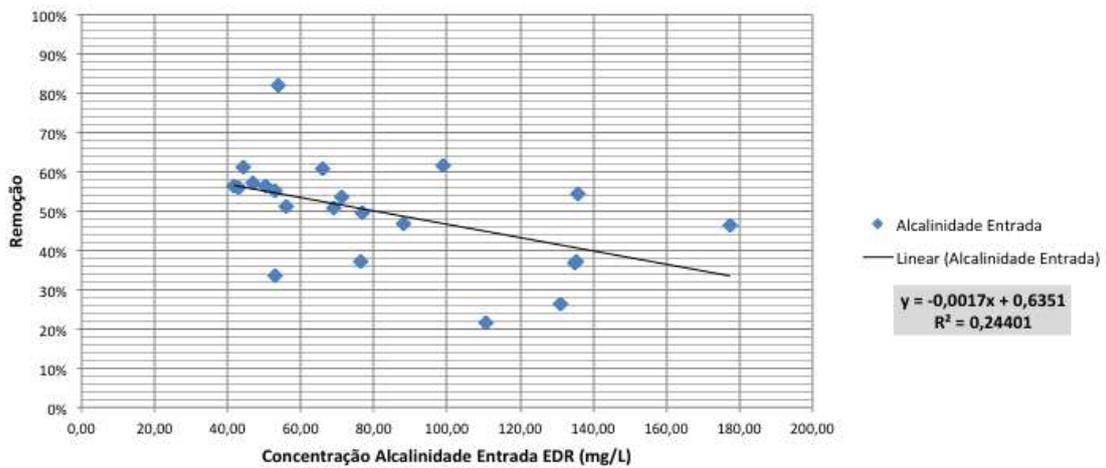
### Remoção Bicarbonato em função da Entrada EDR



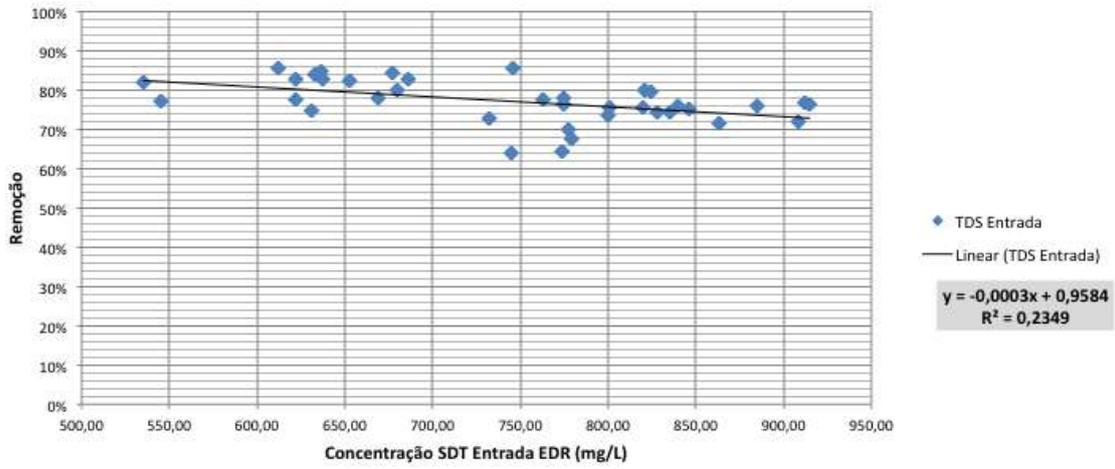
### Remoção TOC em função da Entrada EDR



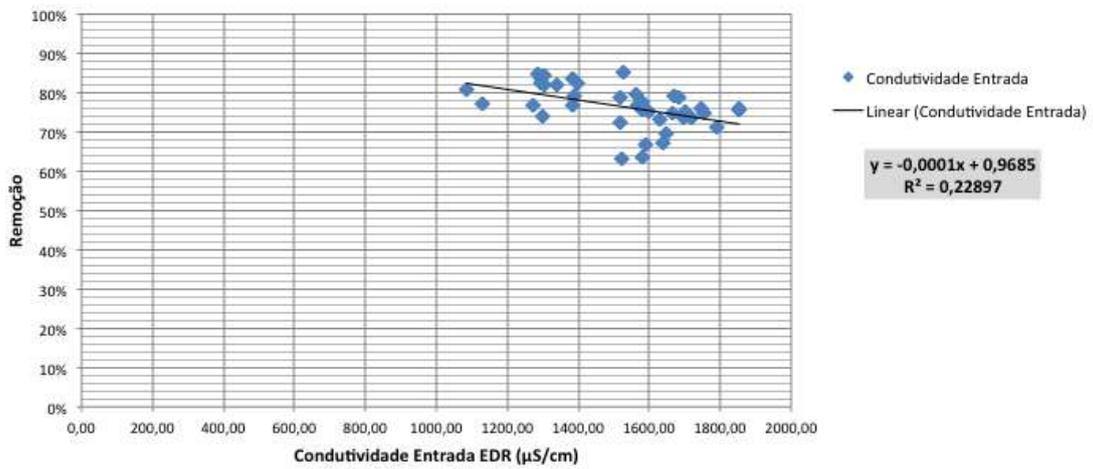
### Remoção Alcalinidade em função da Entrada EDR



### Remoção SDT em função da Entrada EDR

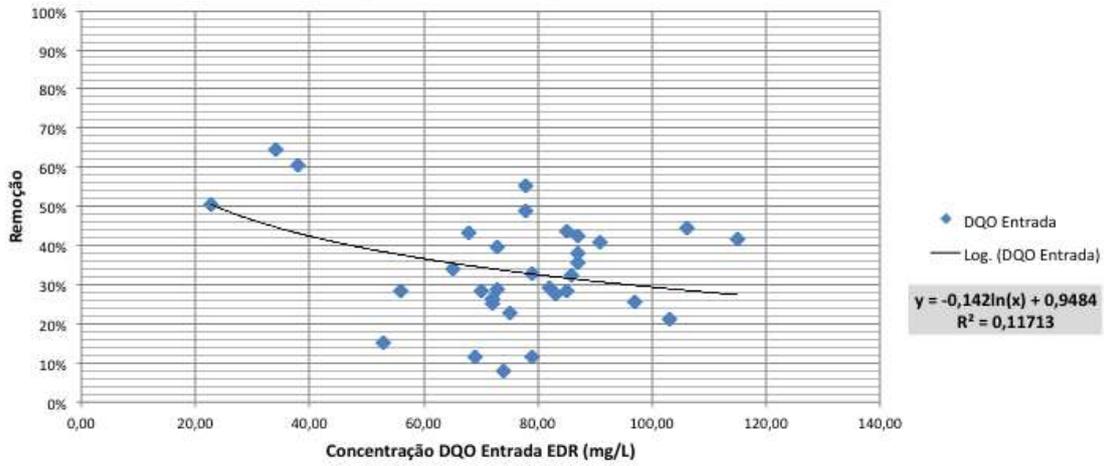


### Remoção Condutividade em função da Entrada EDR

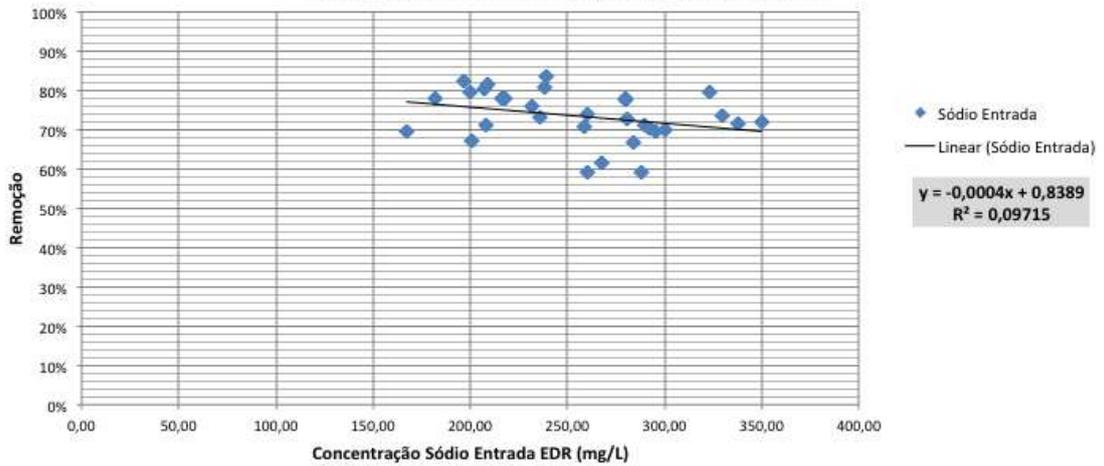


*Correlação Irrelevante:*

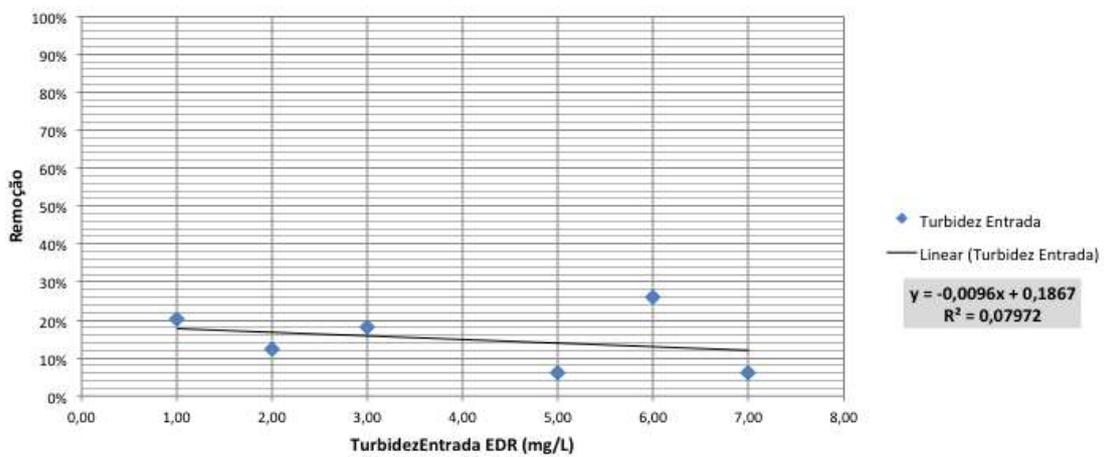
**Remoção DQO em função da Entrada EDR**



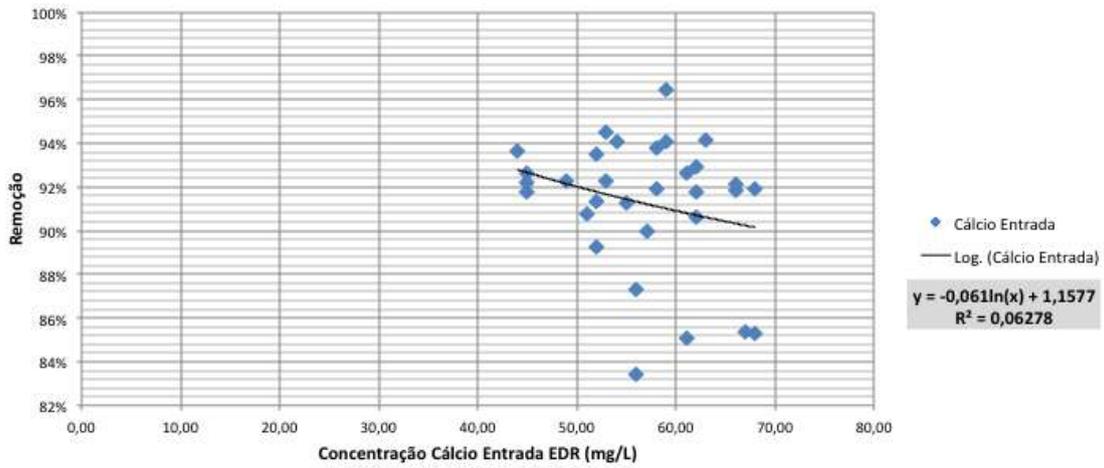
**Remoção Sódio em função da Entrada EDR**



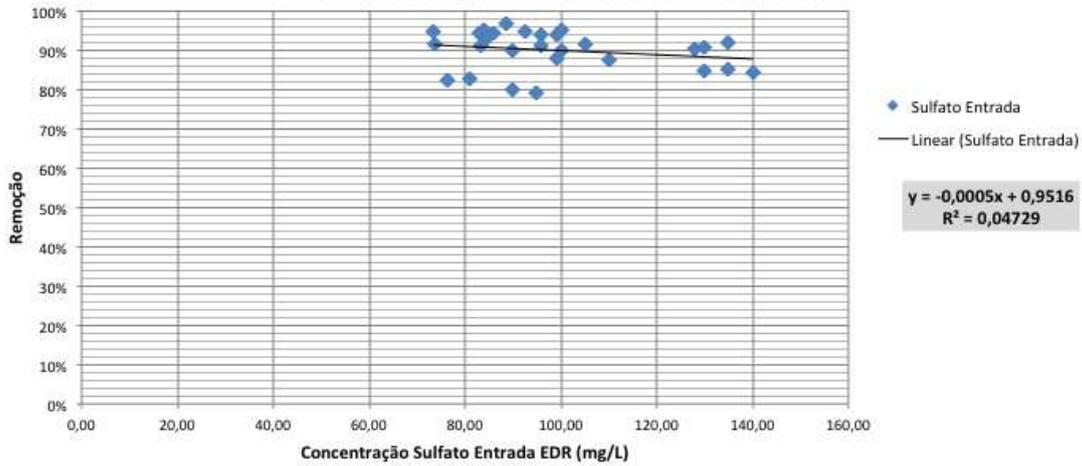
**Remoção Turbidez em função da Entrada EDR**



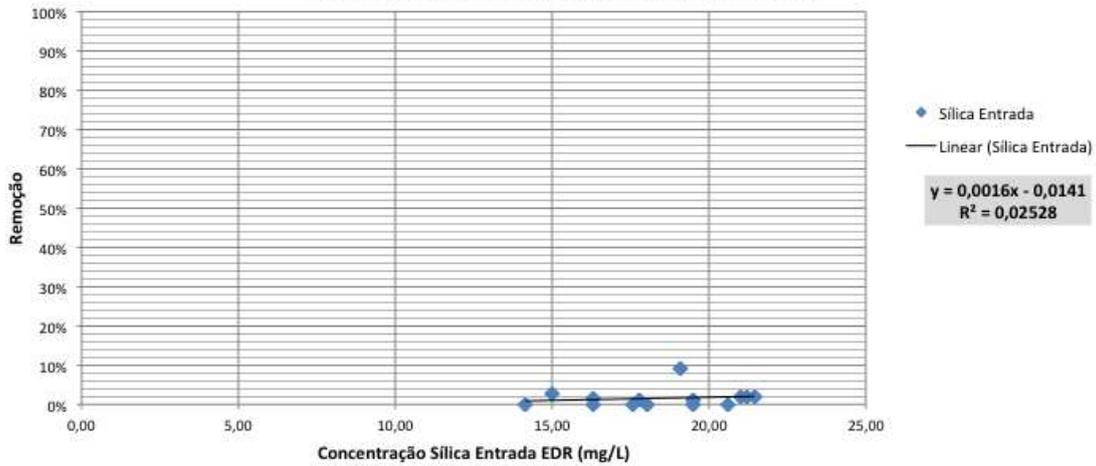
### Remoção Cálcio em função da Entrada EDR



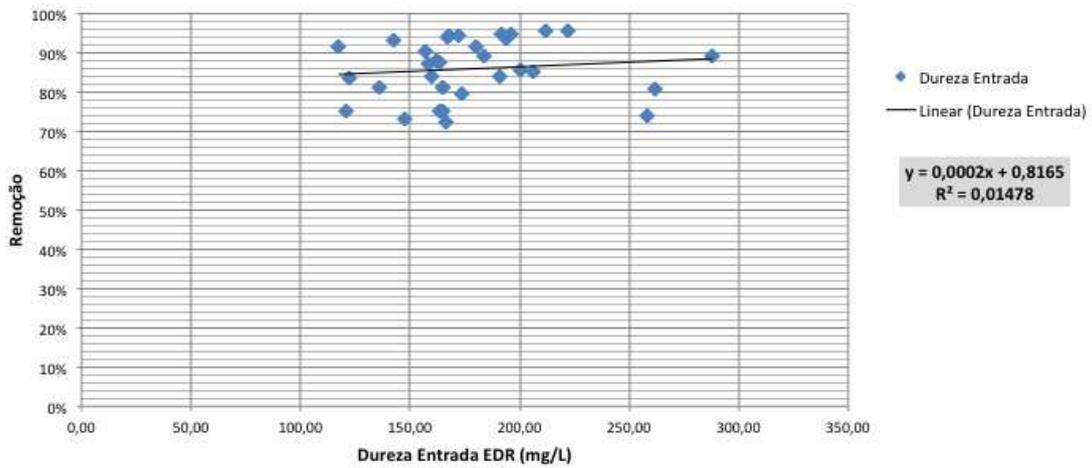
### Remoção Sulfato em função da Entrada EDR



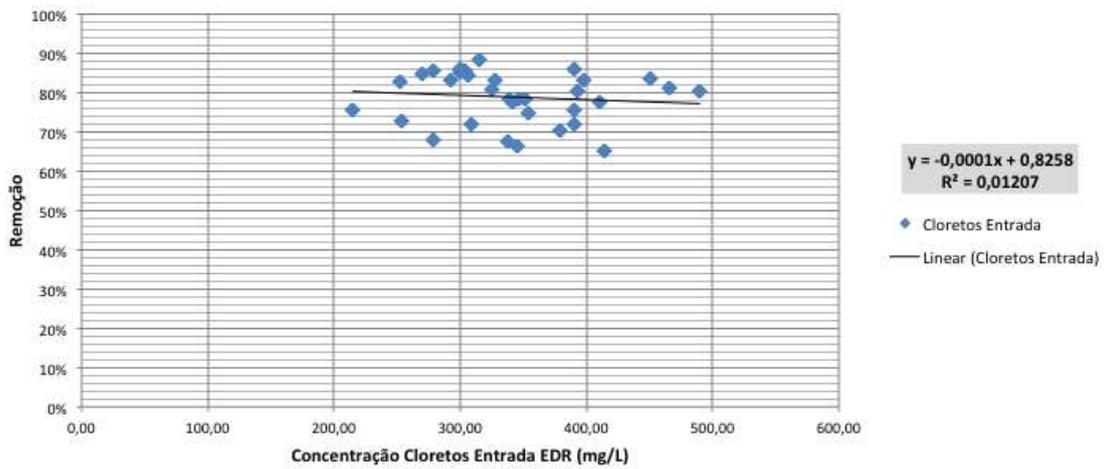
### Remoção Sílica em função da Entrada EDR



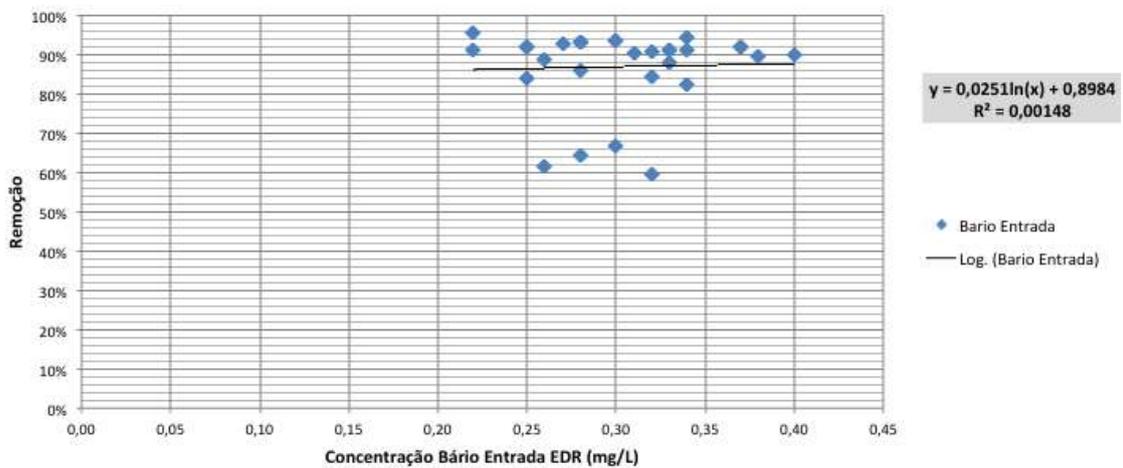
### Remoção Dureza em função da Entrada EDR



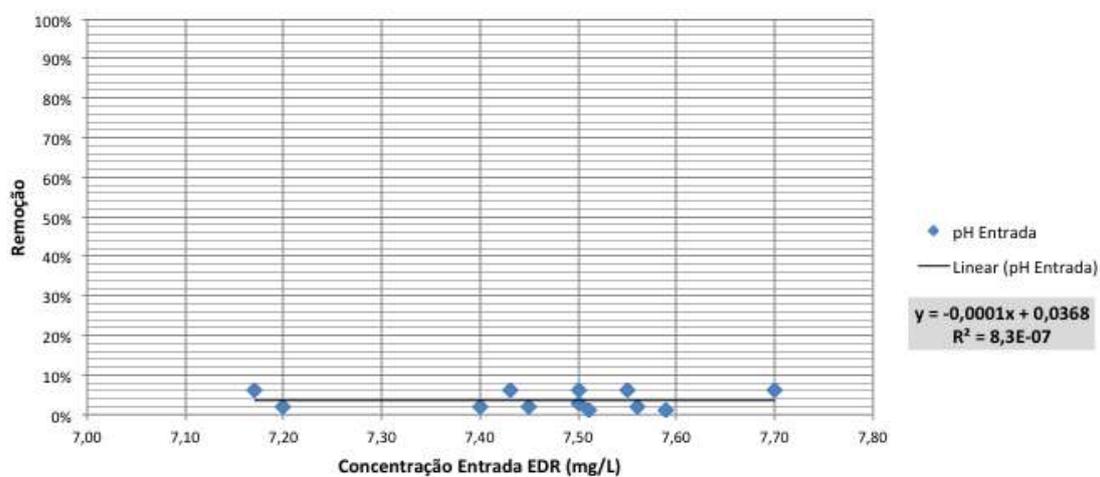
### Remoção Cloretos em função da Entrada EDR



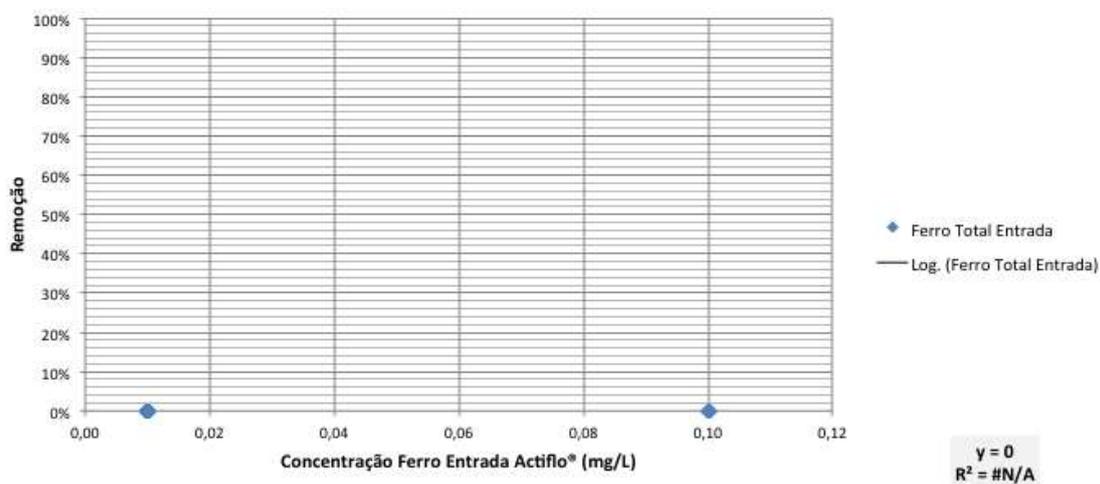
### Remoção Bário em função da Entrada EDR



### Diminuição pH em função da Entrada EDR



### Remoção Ferro em função da Entrada EDR



Dados empregados no Excel utilizados pelo Modelo VBA no caso da EDR:

Parâmetro	Equip.	EDR		Tipo Eq.	R2	a	b
	Unid.	Δ médio	Há remoção?				
COT	mg/L	24%	● 1	LOG	✓ 0,405	0,2498	-0,4613
Ferro	mg/L	57%	● 1	-			
O&G	mg/L	-10%	● 1	-			
SDT	mg/L	77%	● 1	LIN	✓ 0,235	-0,0003	0,9584
Sílica	mg/L	-7%	● 1	LIN	! 0,025		
SST	mg/L	-	● 0				
Condutividade	μS/cm	78%	● 1	LIN	✓ 0,229	-0,0001	0,9685
DBO	mg O2/L	53%	● 1	-			
DQO	mg O2/L	4%	● 0	LOG	! 0,117	-0,142	0,9484
Dureza	mg CaCO3/L	87%	● 1	LIN	! 0,015		
pH	-	-1%	● 0				
Turbidez	NTU	24%	● 1	LIN	! 0,08	-0,0096	0,1867
Alcalinidade	mg/L	55%	● 1	LIN	✓ 0,244	-0,0017	0,6351
Alumínio	mg/L	32%	● 1	-			
Amônia	mg/L	84%	● 1	LOG	✓ 0,736	0,1836	0,4598
Bário	mg/L	87%	● 1	LOG	! 0,001		
Bicarbonato	mg/L	51%	● 1	LOG	✓ 0,592	0,5915	-2,6759
Cálcio	mg/L	91%	● 1	LOG	! 0,063	-0,61	1,1577
Cloretos	mg/L	79%	● 1	LOG	! 0,012		
Magnésio	mg/L	90%	● 1	-			
Manganês	mg/L	73%	● 1	LOG	✓ 0,914	0,2015	1,3848
Sódio	mg/L	73%	● 1	LIN	! 0,097	-0,0004	0,8389
Sulfato	mg/L	76%	● 1	LIN	! 0,047	-0,0005	0,9516

## ANEXO 2:

### Árvore de Cálculo utilizada:

#### 1. Declaração **N<sub>C</sub>**:

$$\rightarrow \rho_{\text{água}} / V_{\text{Actflo}} / C_{\text{coag conc}} / C_{\text{pol1}} / C_{\text{pol1 conc}} / C_{\text{pol2}} / C_{\text{pol2 conc}} /$$
$$TF_{\text{FA}} / Q_{\text{Actflo Proj}} / h_{\text{FA padrao}} / V_{\text{carvao}} / V_{\text{EDR}}$$

#### 2. Especificação **N<sub>E</sub>**:

$$\rightarrow C_{i \text{ Biod}} / Q_{\text{Biod}} / Q_{\text{Lodo}} / C_{\text{coag}} / t / t_0 \text{ carvao virgem} / Q_{\text{conc}}$$

### **Sequência Principal:**

#### 3. Vazões:

3.1.  $Q_{\text{FA}} / Q_{\text{coag}} / Q_{\text{pol1}} / Q_{\text{pol2}}$  (cálculo independente)

3.2.  $Q_{\text{carvao}}$

3.3.  $Q_{\text{EDR}}$

#### 4. Determinação da saturação do carvão:

4.1.  $\Delta t_{\text{carvao ativado}}$

4.2.  $V_{\text{leitos filtrados}}^*$

#### 5. Remoção Actiflo+FA: $\Delta_{i \text{ FA}}$

6. Concentrações saída Actiflo+FA:  $C_{i \text{ FA}} \rightarrow \rho_{\text{FA}}$

#### 7. Remoção Carvão: $\Delta_{i \text{ carvao}}^*$

8. Concentrações saída Carvão:  $C_{i \text{ carvao}} \rightarrow \rho_{\text{carvao}}$

#### 9. Remoção EDR: $\Delta_{i \text{ EDR}}$

10. Concentrações saída EDR:  $C_{i \text{ EDR}} \rightarrow \rho_{\text{EDR}}$

### **Sequência Secundária:**

#### 11. Concentrações nas saídas: Lodo e Concentrado EDR

11.1.  $C_{i \text{ Lodo}} / C_{i \text{ EDR}}$

11.2.  $\rho_{\text{Lodo}} / \rho_{\text{conc}}$

#### 12. Variáveis de operação Actiflo + FA:

12.1.  $\rho_{\text{Biod}} / TRH_{\text{Actiflo}} / A_{\text{FA\_min}}$

12.2.  $TRH_{\text{FA}}$

#### 13. Variáveis de operação Carvão:

13.1.  $TRH_{\text{carvao}} / t_{\text{reativ}}$

#### 14. Variáveis de operação EDR:

14.1.  $TRH_{\text{EDR}} / \Delta C_{\text{SDT}}$

14.2.  $Pot_{\text{EDR}}$

\* Para o cálculo de  $C_{\text{COT}}$  no carvão, é necessário conhecer a variável  $V_{\text{leitos filtrados}}$

## ANEXO 3:

### Programação da Simulação em VBA utilizada:

#### **Sub Init()**

```
' Reinicialização da Simulação
Range("reinit_g1").Cells.ClearContents
Range("reinit_g2").Cells.ClearContents
Range("reinit_g3").Cells.ClearContents
Range("var_calc").Cells.ClearContents
Range("param_g1_lodo").Cells.ClearContents
Range("param_g2_lodo").Cells.ClearContents
Range("param_g1_conc_EDR").Cells.ClearContents
Range("param_g2_conc_EDR").Cells.ClearContents
End Sub
```

#### **Sub Sim()**

```
Worksheets("Sim").Select
' 1. Declaração de Variáveis Nc:
Dim rho_agua As Single, V_Actflo As Single, C_coag_conc As Single, C_poll As Single,
    C_poll_conc As Single, C_pol2 As Double, C_pol2_conc As Single
Dim TF_FA As Single, Q_actflo_Proj As Single, h_FA As Single, N_carv As Single, V_carvao
    As Single, N_ramais_EDR As Single, N_mod_EDR As Single, V_EDR As Single

rho_agua = 1000 ' kg/m3
V_Actflo = Range("V_actflo").Value
C_coag_conc = Range("C_coag_conc").Value
C_poll = Range("C_poll").Value
C_poll_conc = Range("C_poll_conc").Value
C_pol2 = Range("C_pol2").Value
C_pol2_conc = Range("C_pol2_conc").Value
TF_FA = Range("TF_FA").Value
Q_actflo_Proj = 80 ' m3/h
h_FA = Range("h_FA").Value
N_carv = Range("N_carv").Value
V_carvao = Range("V_carvao").Value
N_ramais_EDR = Range("N_ramais_EDR")
N_mod_EDR = Range("N_mod_EDR")
V_EDR = Range("V_EDR").Value

' 2. Especificação de Variáveis Ne:
Dim Q_biod As Single, Q_lodo As Single, C_coag As Single, t As Date, t01 As Date, t02 As
    Date, Q_conc As Single

Q_biod = Range("Q_biod").Value
Q_lodo = Range("Q_lodo").Value
C_coag = Range("C_coag").Value
t = Date ' Dia atual
t01 = Range("data_carv1").Value
t02 = Range("data_carv2").Value
Q_conc_EDR = Range("Q_conc_EDR").Value

' 3. Determinação das Vazões
Dim Q_FA As Single, Q_carvao As Single, Q_EDR As Single, Q_coag As Single, Q_poll As
    Single, Q_pol2 As Single

Q_FA = Q_biod - Q_lodo
Q_carvao = Q_FA
Q_EDR = Q_carvao - Q_conc_EDR
Range("Q_FA").Value = Q_FA
Range("Q_carvao").Value = Q_carvao
Range("Q_EDR") = Q_EDR
```

```

Range("Q_coag") = C_coag * Q_biod / C_coag_conc
Range("Q_poll1") = C_poll1 * Q_biod / C_poll1_conc
Range("Q_poll2") = C_poll2 * Q_biod / C_poll2_conc

```

```
' 4. Determinação da saturação do carvão
```

```

Dim delta_carv1 As Single, delta_carv2 As Single, V_carv_filt As Single
delta_carv1 = t - t01
delta_carv2 = t - t02
Range("delta_carv1").Value = delta_carv1
Range("delta_carv2").Value = delta_carv2
V_carv_filt = 24 * delta_carv2 * Q_FA / (N_carv * V_carv)
Range("V_carv_filt").Value = V_carv_filt

```

```
' 5. ao 10. Remoção dos Parâmetros no Tratamento
```

```
Dim i As Integer, e As String, etapa As Integer, a As Double, b As Double
```

```
For etapa = 1 To 3
```

```
' etapa é a etapa que será simulada: 1: Actiflo+FA / 2: Carvao / 3: EDR
```

```
For g = 1 To 3
```

```
' g é o grupo de parâmetros que será calculado: 1: Principais / 2: CENPES / 3: Controle
```

```
  If etapa = 1 Then
```

```
    e = "_FA"
```

```
  ElseIf etapa = 2 Then
```

```
    e = "_carvao"
```

```
  ElseIf etapa = 3 Then
```

```
    e = "_EDR"
```

```
  End If
```

```
  For i = 1 To Range("param_g" & g).Count ' Loop dos Parâmetros a serem calculados
```

```
    If Range("rem_g" & g & e).Offset(, 1)(i) = 1 Then
```

```
      ' Teste para saber se há Remoção na Etapa
```

```
      If Range("rem_g" & g & e).Offset(, 3)(i) >= 0.2 Then
```

```
        ' Teste para saber se será usada uma Função ou uma Constante de Remoção
```

```
        a = Range("rem_g" & g & e).Offset(, 4)(i)
```

```
        b = Range("rem_g" & g & e).Offset(, 5)(i)
```

```
        If Range("rem_g" & g & e).Offset(, 2)(i) = "LOG" Then
```

```
          ' Tipo de função de Remoção: LOGARITMICA ou LINEAR
```

```
          remocao = a * Log(Range("param_g" & g & e).Offset(, -1)(i).Cells.Value) + b
```

```
        ElseIf Range("rem_g" & g & e)(i).Offset(, 2) = "LIN" Then
```

```
          remocao = a * Range("param_g" & g & e).Offset(, -1)(i).Cells.Value + b
```

```
        End If
```

```
        Else
```

```
          remocao = Range("rem_g" & g & e)(i).Cells.Value
```

```
        End If
```

```
      ' Efeito do Coagulante na Remoção da Turbidez e na Redução do pH
```

```
      If g = 3 And etapa = 1 And i = 5 Or i = 6 Then
```

```
        C_coag_base = 10
```

```
        If i = 6 Then ' Turbidez
```

```
          rem_coag = (0.316 * Log(C_coag) + 0.8946) / (0.316 * Log(C_coag_base) + 0.8946)
```

```
        ElseIf i = 5 Then ' pH
```

```
          rem_coag = (0.0072 * Log(C_coag) + 0.0847) / (0.0072 * Log(C_coag_base) + 0.0847)
```

```
        End If
```

```
        remocao = 0.95 * rem_coag * remocao + 0.05 * remocao
```

```
      End If
```

```
      ' Efeito da saturação do Carvão na Remoção do COT
```

```
      If g = 1 And etapa = 2 And i = 1 And V_carv_filt <= 11400 Then
```

```
        rem_sat = (-0.098 * Log(V_carv_filt) + 0.986)
```

```
        If rem_sat > 0.6 Then
```

```
          rem_sat = 0.6
```

```
        End If
```

```
        rem_sat = rem_sat / (-0.098 * Log(11400) + 0.986)
```

```
        remocao = remocao * rem_sat
```

```

        End If
        If remocao > 1 Then
            remocao = 1
        End if
        Range("param_g" & g & e)(i).Cells.Value = (1 - remocao) * Range("param_g" & g
        & e).Offset(, -1)(i).Cells.Value
    Else
        Range("param_g" & g & e)(i).Cells.Value = Range("param_g" & g & e).Offset(, -
        1)(i).Cells.Value
    End If
Next i
Next g
' Calculo da Densidade na Etapa
Range("dens" & e).Value = rho_agua + Application.WorksheetFunction.Sum(Range("param_g1" &
    e), Range("param_g2" & e)) / 1000
Next etapa

' 11. Concentrações nas saídas: Lodo e Concentrado EDR
For saida = 1 To 2 ' saida é a saida que será calculada: 1: Lodo / 2: Concentrado EDR
For g = 1 To 2 ' g é o grupo de parâmetros que será calculado: 1: Principais / 2: CENPES
    If saida = 1 Then ' Cálculo para Lodo
        s = "_lodo"
        e1 = "_biod"
        e2 = "_FA"
        Q1 = Q_biod
        Q2 = Q_FA
        Qs = 1.05 * Q_lodo
    ElseIf saida = 2 Then ' Cálculo para Concentrado EDR
        s = "_conc_EDR"
        e1 = "_carvao"
        e2 = "_EDR"
        Q1 = Q_carv
        Q2 = Q_EDR
        Qs = -Q_conc_EDR
    End If
    For i = 1 To Range("param_g" & g).Count ' Loop dos Parâmetros a serem calculados
        C = (Range("param_g" & g & e1)(i) * Q1 - Range("param_g" & g & e2)(i) * Q2) / Qs
        If Range("param_g" & g & e2)(i).Value <> 0 And C > 0 Then
            Range("param_g" & g & s)(i).Value = C
        Else: Range("param_g" & g & s)(i).Value = 0
        End If
    Next i
Next g
' Calculo da Densidade na Saida
Range("dens" & s).Value = rho_agua + Application.WorksheetFunction.Sum(Range("param_g1" &
    s), Range("param_g2" & s)) / 1000
If saida = 1 Then
    Range("dens" & s).Value = Range("dens" & s).Value + (C_coag + C_poll1 + C_pol2) / 1000
End If
Next saida

' 12. Variáveis de Operação Actiflo + FA
Range("dens_biod").Value = rho_agua + Application.WorksheetFunction.Sum(
    Range("param_g1_biod"), Range("param_g2_biod")) / 1000 ' Densidade Biodisco
Range("TRH_actflo").Value = V_Actflo / Q_biod * 60 ' TRH Actiflo
A_min_FA = Q_actflo_Proj / TF_FA * 24 ' Area mínima Filtro de Areia
Range("A_min_FA").Value = A_min_FA
Range("TRH_FA").Value = A_min_FA * h_FA * 60 / Q_FA ' TRH Filtro de Areia

' 13. Variáveis de Operação Carvão
Range("TRH_carv") = (N_carv * V_carv) / Q_FA * 60 ' TRH Carvão

```

```

If 48 / 75 * Q_FA - delta_carv1 > 0 Then ' Tempo Restante para Reativação 1° Leito Carvão
  Range("t_reat_carv1") = 48 / 75 * Q_FA - delta_carv1
  Else: Range("t_reat_carv1").Value = 0
  End If
If 48 / 75 * Q_FA - delta_carv2 > 0 Then ' Tempo Restante para Reativação 2° Leito Carvão
  Range("t_reat_carv2") = 48 / 75 * Q_FA - delta_carv1
  Else: Range("t_reat_carv2").Value = 0
  End If

' 14. Variáveis de Operação EDR
Range("TRH_EDR") = N_ramais_EDR * N_mod_EDR * V_EDR / Q_carvao * 60 ' TRH EDR
delta_SDT = Range("param_g1_carvao")(5) - Range("param_g1_EDR")(5) ' Remoção de Sólidos
  Dissolvidos Totais na EDR
Range("Pot_EDR") = 0.7 * Q_EDR + 1.25 * Q_EDR * delta_SDT / 1000 ' Potência consumida na
  EDR

End Sub

```